

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta textilní

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2007

Bc. Milan Bouška

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA TEXTILNÍ

Katedra : Textilních materiálů

Obor studia: 31 – 06 – T Textilní materiálové inženýrství

ANIZOTROPIE REZISTIVITY TEXTILIÍ

Anisotropy of textile resistivity

Bc. Milan Bouška

Vedoucí diplomové práce: Ing. Miroslava Maršálková

Konzultant:

Rozsah práce a příloh:

Počet stran: 57

Počet obrázků: 112

Počet příloh: 1

V Liberci, dne 3.1.2007

Anotace

Diplomová práce se zabývá měřením anizotropie rezistivity textilií a ověřením funkčnosti nového přípravku pro její měření. Byly naměřeny hodnoty rezistence na tkaninách s keprovou vazbou, do které byla zatkána vodivá vlákna s variabilní roztečí a to jak v osnově, tak i v útku. Anizotropie rezistivity textilií byla měřena v oblasti úhlů 0° až 90° s krokem 10° , pro čtyři různé vzdálenosti elektrod přípravku.

Vzájemným porovnáním naměřených hodnot a grafů, popisujících izotropní a anizotropní elektrické vlastnosti textilií, byla ověřena vhodnost a funkčnost přípravku.

Klíčová slova: rezistence, elektrická povrchová rezistivita, izotropní a anizotropní elektrické vlastnosti, antistatická vlákna

Annotation

The thesis deals of the measuring of anisotropy of textile resistivity and verification of new preparative functionality. There were measured rates of resistance at woven fabric with twill weave, in which the conductive fibres were woven at variable spacing in direction of warp and weft. Anisotropy of textile resistivity was measured in range from 0° to 90° in the step of 10° . It has been done for four different distances of preparative electrodes.

The fitness and functionality of preparative was found by the mutual comparing of real measured rates and graphs, which are describing isotropic and anisotropic electrical textile characteristics.

Key words: resistivity, electrical resistivity of textile surface, isotropic and anisotropic electrical characteristics, antistatic fibres

Prohlášení

Byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum: V Liberci, dne 3.1. 2007

Podpis:

Poděkování

Rád bych na tomto místě poděkoval vedoucímu své diplomové práce, slečně Ing. Miroslavě Maršálkové za rady, připomínky, náměty a trpělivost, kterou mi věnovala při vytváření této práce. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Marošovi Tunákovi za rady a připomínky.

Také bych zde chtěl poděkovat svým rodičům, kteří mi umožnili studium na této škole a po celou dobu mě materiálně i psychicky podporovali a bez kterých by tato práce nikdy nevznikla.

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

\vec{B} – vektor magnetická indukce [T]

cN – centinewton

c – rychlost světla ve vakuu [ms^{-1}]

E – energie [J]

\vec{E} – vektor intenzity elektrického pole [Vm^{-1}]

E_F – Fermiho energie

Exp – exponent

ϵ – permitivita [Fm^{-1}]

F – silové působení [N]

k – Boltzmanova konstanta [$1,38 \cdot 10^{-21} \text{ JK}^{-1}$]

l – vzdálenost dipólů [nm]

LOI – limitní oxidační číslo

m – moment dipólů [Cm]

n – počet element. dipólů [i]

Obr. – obrázek

P – polarizace [Cm]

PAD – polyamid

PES – polyester

POP – polypropylen

Q – bodový náboj [C]

q – elementární dipól [Cm]

q – velikost elektrostatického náboje [C.mol^{-1}]

\vec{l}_0 – bezrozměrný jednotkový vektor

R – elektrický odpor [Ω]

R_m – naměřená hodnota rezistivity [$\Omega, \Omega\text{m}$]

R_N – normálový odpor [Ω]

S – plocha elektrod [m^2]

str. – strana

T – teplota [K]

Tab. – tabulka

U_m – napětí [0,1 V]

U_s – zkušební napětí [V]

U_p – průrazové napětí [V]

v – rychlost [ms^{-1}]

$^{\circ}\text{C}$ – stupeň Celsia

dtex – decitex

J – Joul

K – Kelvin

kg – kilogram

mm – milimetr

mol. – mol

Ω – ohm [$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{A}^{-2}$]

OBSAH

1. ÚVOD	17
2. TEORETICKÁ ČÁST	18
2.1. Elektromagnetické pole	18
2.2. Elektrostatické pole	20
2.2.1. Vlastnosti elektrostatického pole	20
2.3. Elektrické vlastnosti látky	21
2.3.1. Pásový model látky	22
2.3.2. Kritéria polovodivých látek.....	25
2.4. Dielektrické vlastnosti	26
2.4.1. Typy dielektrik	27
2.5. Chemická vazba a vodivost pevných látek.....	28
2.5.1. Primární vazby	30
2.5.2. Sekundární vazby (nevazebné interakce).....	33
2.6. Měření elektrizovatelnosti textilií	34
2.7. Způsob měření anizotropie elektrické rezistivity materiálů a zařízení k jeho provádění.....	36
2.7.1. Popis přístroje.....	37
3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	41
3.1. Popis experimentu	41
3.2. Popis použitých vzorků	42
3.2.1. Použité vodivé vlákno	43
3.3. Popis měření.....	45
3.3.1. Přesnost měření	45
3.3.2. Měření	46
3.3.3. Naměřené hodnoty anizotropie rezistivity	47
4. DISKUZE A VÝSLEDKY	72
5. ZÁVĚR.....	75
6. SEZNAM LITERATURY	76
7. PŘÍLOHY	77

1. ÚVOD

V dnešním technickém světě se při výrobě používá stále více kompozitních materiálů. Proto je u celé řady materiálů žádoucí zjištění anizotropie jejich elektrických vlastností. Zejména u materiálů, u kterých jejich anizotropie ovlivňuje jejich výsledné elektrické vlastnosti, jako jsou například textilie s vodivými vlákny, kompozity s rastrem, povrchy s různou gravurou, vrapové povrchy atd..

Antistatické textilie se používají do speciálních provozů (výroba léků, výbušnin, mikročipů, kosmetický výzkum atd.), proto je velmi důležité, aby měli elektrické vlastnosti nejen vyhovující, ale také izotropní, což znamená, aby byli ve všech směrech stejné.

Stávající normovaná metoda, při které jsou používány kruhové elektrody, není vhodná pro měření elektrických vlastností s rastrem, jelikož naměřené hodnoty popisují komplexní povrchovou elektrickou rezistivitu materiálu. Avšak neumožňuje zjištění anizotropie elektrické rezistivity materiálu, tj. zjištění rozdílnosti elektrické rezistivity materiálu v různých směrech vůči povrchu materiálu.

V této práci byla ověřována metodika měření anizotropie elektrické rezistivity materiálů a funkčnost přípravku, aplikována na tkaniny, do kterých bylo zatkáno vodivé vlákno s variabilní roztečí. Způsob měření, spočíval v tom, že mezi měřicími elektrodami se vytvořila lineární vzduchová mezera a elektrická rezistivita povrchu měřeného materiálu se zjišťovala ve směrech od 0° do 90° . Z hodnot elektrické rezistivity povrchu měřeného materiálu zjištěných v různých směrech povrchu měřeného materiálu se určila anizotropie povrchové elektrické rezistivity měřeného materiálu.

2. TEORETICKÁ ČÁST

2.1. Elektromagnetické pole

Elektromagnetické pole nás obklopuje i prostupuje ve všech situacích ve velkém počtu forem. Přichází k nám z vesmíru a vytváříme je i sami nejen anténami, ale každým úsekem elektrického vedení, každým výbojem atd.. Víme, že toto pole je nositelem energie a je schopno konat práci. Má také příslušnou hmotnost, která je s energií vázána Einsteinovým vztahem:

$$E = mc^2 \quad (1)$$

kde E ...energie (práce) [J]

m ...hmotnost [kg]

c ...rychlost světla ve vakuu [ms^{-1}]

Elektromagnetické pole je tvořeno elektrickou a magnetickou složkou a může být statické, s časově konstantními složkami, nebo dynamické, kdy jsou složky časově závislé. Elektromagnetické pole působí na bodový náboj pohybující se relativní rychlostí v [m/s] k jisté pozorovací soustavě silou, která se nazývá Lorenzova

$$\vec{F} = Q(\vec{E} + v\vec{B}). \quad (2)$$

Q ...bodový náboj [C]

\vec{E} ...intenzita elektrického pole [V/m]

\vec{B} ...magnetická indukce [T]

Vektory \vec{E} a \vec{B} tedy rozhodují o silových účincích na náboje a považujeme je za základní vektory pole. Měly by se nazývat intenzitami pole, avšak tento název připadl pouze vektoru \vec{E} , zatímco vektor \vec{B} se nazývá magnetická indukce.

V případě stacionárního pole jsou elektrická i magnetická složka nezávislé. Stacionární pole můžeme dále dělit podle charakteru prostředí:

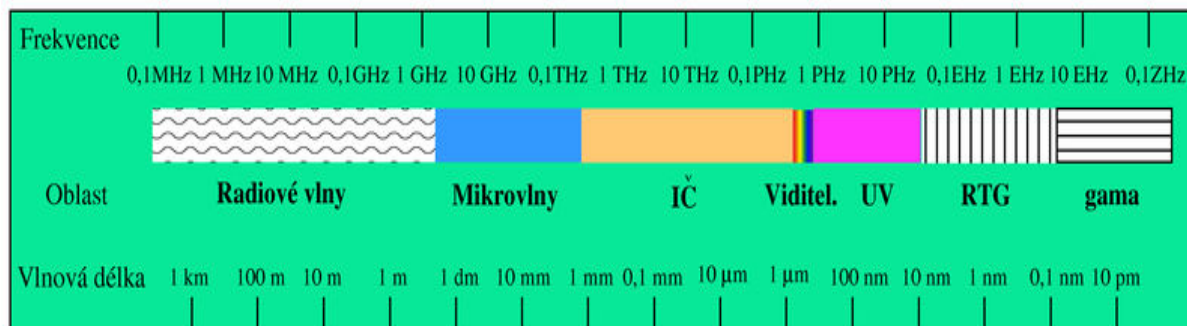
- 1) **elektrostatické** – pole v dielektriku ($\vec{E} \neq 0, \vec{B} = 0$)
- 2) **proudové pole** – ve vodivém prostředí
- 3) **magnetické** – vybudí jej proudové pole

add 1) U dynamického elektrostatického pole existuje ve formě elektromagnetické vlny, které existují ve velmi širokém rozsahu vlnových délek. I když je podstata těchto vln stejná, nezávislá na vlnové délce, jejich účinek na daný materiál a tedy i forma, jak se elektromagnetické vlny projevují, na vlnové délce silně závisí.

add 2) Elektromagnetické vlnění má dvojitý charakter, vlnový a částicový. Dopad elektromagnetického záření na povrch látky můžeme tedy popisovat jako dopad elektromagnetické vlny, nebo jako proud částic, zvaných fotony. Částicový charakter záření se může například projevit fotoelektrickým jevem, tedy uvolnění elektronů z látky.

add 3) Elektromagnetické vlny existují ve velmi širokém rozsahu vlnových délek. Ačkoliv je podstata těchto vln stejná, nezávislá na vlnové délce, jejich účinek na látku a tedy i forma, jak se elektromagnetické vlny projevují, na vlnové délce silně závisí. Uměle vytváříme elektromagnetické vlny od vlnových délek v řádech km do vlnových délek až pod 1 mm. V nevodivém prostředí je rychlost šíření obecně nižší a vlna je více či méně tlumena. Ve vodivém prostředí dochází k odrazu elektromagnetické vlny a vlna je zde silně tlumena, působí jen ve velmi tenké povrchové vrstvě, jejíž tloušťka závisí především na vodivosti prostředí. Z tohoto rozboru je zřejmé, že interakce elektromagnetického záření s daným materiálem při různých vlnových délkách tohoto záření vede k diametrálně odlišným jevům, které souvisí s rozdílnými fyzikálními vlastnostmi látky.

Podle vlnové délky dělíme elektromagnetické vlny do několika oblastí tak, že pro každou oblast je charakteristická určitá interakce s látkou. Hrubé dělení je na obr. 1.



Obr. 1: Elektromagnetické spektrum
(IČ – infračervené záření, UV – ultrafialové záření, RTG – rentgenové záření)

Přestože dělení je celkově přesné, může občas dojít k překryvům sousedních typů. Například některé záření gama může mít delší vlnovou délku než některé rentgenové záření. To je možné proto, že záření gama je jméno pro fotony vzniklé při jaderném štěpení a jiných jaderných procesech, zatímco rentgenové záření vzniká jako brzdné záření či charakteristické záření elektronu. Překryv tu tedy nastává proto, že paprsky určujeme dle původu a nikoli dle frekvence. [2, 4, 5]

2.2. Elektrostatické pole

Prakticky vzato se statické náboje a elektrostatické pole vyskytují v technické praxi jen zcela výjimečně. Není mnoho zařízení, která by byla založena na elektrostatických principech. Avšak elektrická pole mezi vodivými kovovými elektrodami jsou při časových změnách téměř rovna polím elektrostatickým a také se tak vždy vyšetřují. Zjišťuje se například, v kterých místech je intenzita pole taková, že by mohla ohrozit izolační pevnost materiálu, bezpečnost osob apod..

2.2.1. Vlastnosti elektrostatického pole

Elektrostatické pole je pole časově stálé (stacionární) a šíří se v dielektriku ($\vec{E} \neq 0, \vec{B} = 0$). Zdrojem takového pole mohou být pouze náboje. Všechny zákonitosti elektrostatického pole lze odvodit z Coulombova zákona, podle kterého síla působí mezi dvěma nosiči statických bodových nábojů Q_i je úměrná $Q_1 Q_2 / r^2$, kde r je vzdálenost mezi nimi. Vliv prostředí je popsán permitivitou ϵ_0 , která je síla nepřímo úměrná. Kvantitativně je pole charakterizováno

vektorem \vec{E} , který značí co do velikosti i směru síly, která by působila na kladný jednotkový náboj (obr. 2a). V tomto případě předpokládáme, že nezávisí na intenzitě pole \vec{E} , čili že prostředí je lineární

$$\rho_{\vec{E}} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{Q \vec{r}_0}{r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{Q \vec{r}}{r^3} = \frac{1}{\epsilon} \frac{Q}{4\pi r^2} \vec{r}. \quad (3)$$

Q ...jednotkový náboj [C]

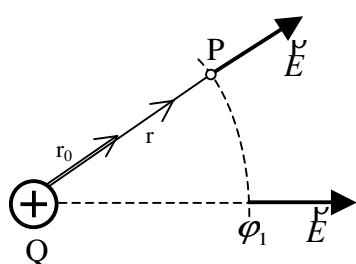
ϵ ...permitivita [Fm^{-1}]

$$\rho_0 = \frac{\vec{r}}{r} \quad (4)$$

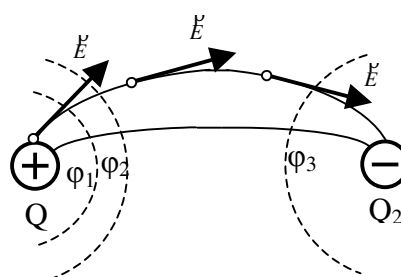
\vec{r}_0 ...bezrozměrný jednotkový vektor

Při konstantním ϵ závisí intenzita \vec{E} na náboji Q lineárně. Proto platí princip superpozice. Podle něho je výsledná intenzita buzená několika náboji rovna (vektorovému) součtu intenzit buzených odděleně jednotlivými náboji.

Geometrická pomůcka pro představu o geometrickém rozložení pole se nazývá siločára. Je to čára (linie) vektoru \vec{E} , k níž je orientovaná úsečka vyznačující vektor \vec{E} ve všech bodech tečnou (obr. 2b). Z toho vyplývá, že každým bodem pole prochází pouze jediná siločára, tudíž se neprotínají. Siločáry nepředstavují žádné fyzikálně reálné objekty. [2, 9]



Obr. 2a: Pole bodového náboje



Obr. 2b: Linie intenzity \vec{E} (siločáry)

2.3. Elektrické vlastnosti látky

Při studiu elektrických jevů v látce se vychází z popisu dvou mezních případů: vodiče a izolátoru. Sleduje se především pohyb nabitých částic, které se nazývají náboje a silové působení elektrického pole. Ve vodiči se náboje účinkem elektromagnetického pole pohybují jedním směrem a při pohybu překonávají určitý odpor od sousedních částic, který se popisuje vodivostí. V důsledku tohoto odporu je nutno k zachování toku částic dodávat neustále energii. V izolátoru se účinkem elektrického pole náboje okamžitě dostanou do nové polohy a po vypnutí elektrického pole se vrátí do původní polohy. Polymery (tedy i textilní vlákna) mají vlastnosti jak vodičů, tak izolátorů. Tato skupina látek se nazývá dielektrika. [5, 10]

Základním modelem látky, z něhož lze odvodit její elektrické vlastnosti se nazývá pásový model. Elektrony v izolovaném atomu (každý z nich tvoří samostatný systém) mají přesně dány hodnoty energie, tj. energetické hladiny, které jsou obsazovány elektrony od nejnižších energií. Jestliže se atomy přiblíží k sobě, začíná se postupně vytvářet jeden systém a následně dochází k nepatrnému posunutí energetických hladin, aby na každé zůstaly maximálně dva elektrony. Jedná se o štěpení energetických hladin. [5, 6]

2.3.1. Pásový model látky

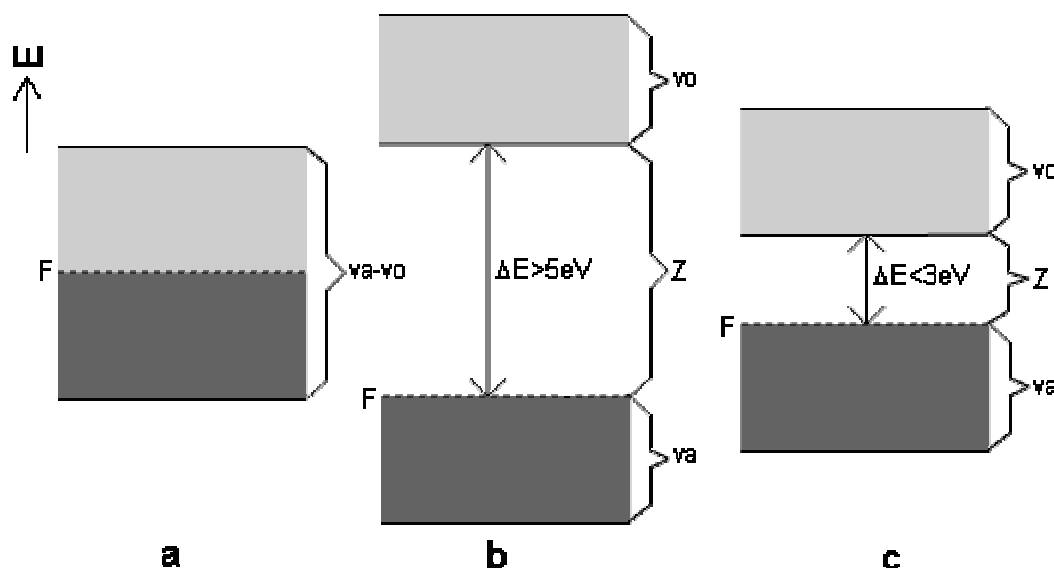
Obsazování dovolených energetických pásů v tuhých látkách se řídí týmiž principy jako obsazování lokalizovaných orbitalů v molekulách.

1. Elektrony zaplňují jednotlivé hladiny v pásu tak, aby měly co nejmenší energii.
2. Při zaplňování pásu elektrony se uplatňuje Pauliho princip. Do dovoleného pásu o N hladinách může být umístěno maximálně $2N$ elektronů.
3. Teprve po úplném obsazení energeticky nižšího pásu obsazují elektrony pás s vyšší energií.

Je samozřejmé, že uvedené zásady platí jen tehdy, když v dané soustavě atomů nedochází k velkému tepelnému pohybu nebo když nepůsobí jiné fyzikální vlivy vyvolávající excitaci přítomných elektronů. Tohoto stavu můžeme dosáhnout při teplotě 0 K , pokud zabráníme styku látky s elektromagnetickým zářením.

Je-li celý systém elektronů tuhé látky na nejnižších možných hladinách, nabývá zvláštního významu nejvyšší energetická hladina v dovoleném pásu, která je právě ještě zaplněna dvojicí elektronů. Nazývá se **Fermiho hladina** a podle jejího umístění v dovoleném

energetickém pásu při teplotě 0 K můžeme posuzovat některé fyzikální vlastnosti a povahu vazby v daném souboru atomů:



Obr. 3: Hypotetický fázový diagram (při teplotě 0K):

a) kovu, b) izolantu, c) polovodiče.

Vybarvené oblasti pásu označují oblast plně hladin obsazených elektrony. Fermiho hladina je označena F, valenční pás - va, vodivostní pás - vo, valenčně-vodivostní pás - va-vo a zakázaný pás Z.

Fermiho energie je jednou z charakteristik pevných látek. Jak je známo, při vytvoření pevné látky se původní energetické hladiny plynných atomů rozštěpí v téměř plynulé pásy. Tento jev je důsledkem Pauliho pravidla, podle kterého žádné dva elektrony v systému nemohou zaujmout stejný stav, vzhledem ke dvěma hodnotám spinu elektronů mohou tedy stejnou energii mít pouze dva elektrony. Pásy takto vzniklé, mohou se buď překrývat, jako je tomu u kovů, nebo je mezi nimi mezera, kterou nazýváme zakázaným pásem. Uvažujeme-li pevnou látku z N atomů, bude mít každý pás právě N podhladin, na než je možno umístit $2N$ elektronů. Protože máme pouze N elektronů, je možno mít i neobsazené stavy. To, s jakou pravděpodobností bude daná hladina obsazena, závisí na její energii E podle vztahu

$$P = \frac{1}{e^{\frac{E-E_F}{kT}} + 1} \quad (5)$$

k ...Boltzmannova konstanta (přibližně 10^{-23} J/K)

T ...absolutní teplota [K]

E_F ...Fermiho energie

Jsou-li všechny hladiny v pásu obsazeny, elektrony si mohou pouze vyměňovat místa na energických hladinách, tudíž nemohou vést elektrický proud, protože to je podmíněno uspořádaným pohybem elektronů. Jestliže se zvýší energie jednoho z nich, pak dochází ke snížení energie jiného elektronu o stejnou hodnotu, střední energie elektronů v tomto pásu se nemění a nevzniká uspořádaný pohyb těchto částic. Na vedení proudu se mohou podílet pouze elektrony v neúplně obsazeném pásu.

Vzájemná poloha energetických pásů pak rozhoduje o zařazení látek do skupin:

- 1) vodiče**
- 2) izolátory**
- 3) vlastního polovodiče**

add 1) Látka je vodičem, jestliže je valenční pás buď neúplně obsazen, do této skupiny patří např. jednomocné kovy, nebo pokud se překrývá vodivostní a valenční pás – příkladem jsou dvojmocné kovy.

add 2) Látka je izolátorem při teplotě absolutní nuly, jestliže je valenční pás plně obsazen. Při vyšší teplotě pak získávají elektrony dodatečnou energii, která má průměrnou hodnotu:

$$E_e = kT \quad (6)$$

k ...Bolzmannova konstanta ($k = 1,38 \cdot 10^{-21} \text{ JK}^{-1}$)

T ...teplota [K]

add 3) Je-li šířka zakázaného pásu srovnatelná s energií kT , mohou elektrony o nejvyšších energiích přejít do vodivostního pásu a zajistí tak vedení proudu. V důsledku přechodu elektronů do vodivostního pásu, nejsou horní hladiny valenčního pásu plně obsazené a mohou na ně přejít elektrony z nižších hladin tohoto pásu a proud vedou i elektrony ve valenčním pásu. Vodivost je tedy způsobena elektrony ve vodivém pásu a dírami ve valenčním pásu. Tato vodivost s rostoucí teplotou výrazně stoupá, protože se zvyšuje koncentrace elektronů a děr. Látka s úzkým zakázaným pásem se nazývá vlastní polovodič.

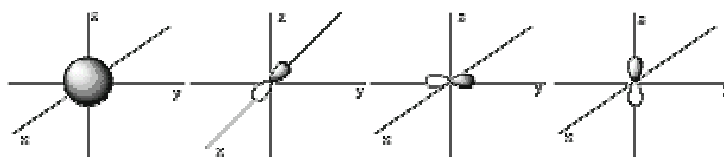
Předchozí pásové modely neuvažovaly přítomnost poruch ve struktuře látky, což mohou být cizí atomy, molekuly, chybějící atomu apod. Elektronům cizích atomů přísluší jiné hladiny energie a tyto hladiny se mohou nacházet v zakázaném pasu. Pokud leží v jeho horní části nazýváme je donory, jsou-li v dolní oblasti zakázaného pásu jedná se o akceptory.

Při teplotě absolutní nuly je látka nevodičem, protože elektrony jsou vázány na poruchy, valenční pás je plný, vodivostní prázdný. Při vyšší teplotě mohou elektrony přeskocit z donorových hladin do vodivostního pásu a způsobit tím elektronovou vodivost. Elektrony mohou také přejít na akceptorovou hladinu, ale těchto hladin je málo, jsou již při nízkých teplotách obsazeny elektrony, které pak nemohou přispívat k vedení elektrického proudu.

Díry se mohou ve valenčním pásu pohybovat po elektronech, vzniká děrová vodivost. Z uvedeného vyplývá, že přidáním vhodných příměsí je možné výrazně zvýšit vodivost izolátoru, donory vyvolají vodivost elektronovou, akceptory vyvolají děrovou vodivost. [5, 6, 12]

2.3.2. Kritéria polovodivých látek

Hlavním předpokladem pro vytvoření polovodivých vlastností je alespoň částečná kovalentní vazba, která je vázána na existenci elektronových orbitalů s a p alespoň u jednoho ze dvou atomů, které jsou v elementární buňce spojeny touto vazbou



Obr. 4: Schematické zobrazení orbitalů s , p_x , p_y a p_z .

Byla vždy snaha najít pravidlo, podle něhož by se dalo z chemického symbolu sloučeniny usoudit, zda jde o polovodič. Starší Zintlovo pravidlo, podle něhož by látka měla být polovodivá, je-li počet všech valenčních elektronů sloučeniny dělitelný osmi, se nahradilo podstatně přesnějším kritériem Moosera a Pearsona

$$\frac{N_e}{N_a} + s = 8, \quad (7)$$

kde N_e je celkový počet všech valenčních elektronů v molekule, N_a je počet atomů s valencí rovnou 4 nebo větší, s je počet kovalentních vazeb tvořených atomem s valencí 4 nebo větší s ostatními podobnými atomy.

Tak například podle Zintlova pravidla není CdSb polovodičem, protože celkový počet valenčních elektronů v molekule je pouze 7. Vzhledem k tomu, že existuje ještě jedna mimořádná vazba $s = 1$, má CdSb polovodivé vlastnosti, jak vyplývá z rovnice. [7]

2.4. Dielektrické vlastnosti

Polymerní látky se chovají jako dielektrika (nevodiče). K vysvětlení jevů spojených s působením elektrického pole na dielektrika se zavádí zejména veličina nazývaná se polarizace. Vliv elektrického pole na dielektrikum se vysvětluje tak, že účinkem tohoto se v dielektriku kladné a záporné náboje navzájem posunou. Dvojice stejně velkých nábojů opačného znaménka v malé vzdálenosti od sebe tvoří elementární dipól. Je popsán momentem dipólu:

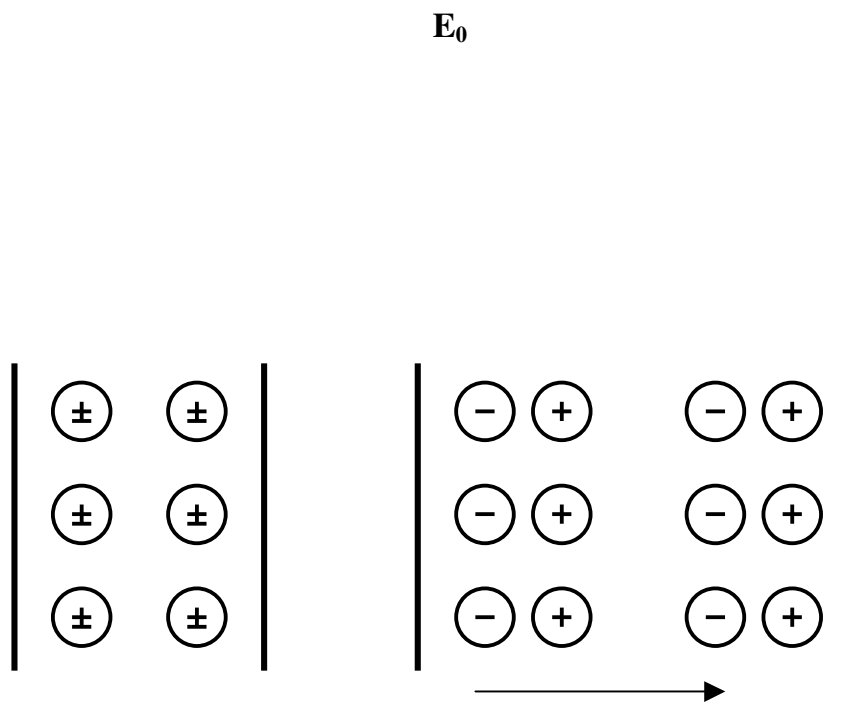
$$m = ql \quad (8)$$

m ... moment dipólu [Cm]

q ...elektrostatický náboj [Cm]

l ...vzdálenost dipólu [m]

Vznik dipólů v dielektriku účinkem elektrického pole nazýváme polarizací izolátoru (obr. 5). [5, 16]



Obr. 5: Posunutí nábojů vlivem elektrického pole (polarizace)

Dipólový moment objemové jednotky dielektrika se nazývá polarizací:

$$P = nm \quad (8)$$

P ... polarizace [Cm]

n ...počet elementárních dipólů [1]

m ...moment dipólu [Cm]

2.4.1. Typy dielektrik

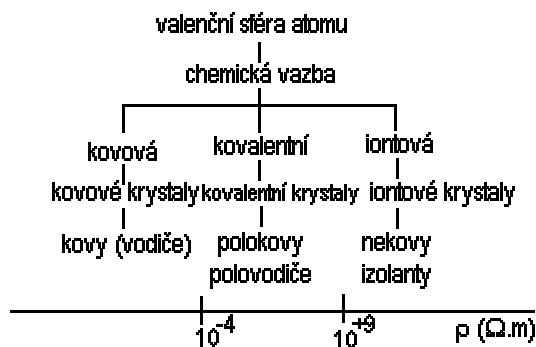
Dielektrika můžeme rozdělit na:

- *Dielektrika se stálými dipóly* – jsou tvořena polárními molekulami jež mají stálý dipólový moment P . Za nepřítomnosti pole jsou tyto dipóly orientovány chaoticky, v poli se orientují, proto se jejich polarizace nazývá orientační.
- *Dielektrika s částečně proměnnými dipóly* – dipólové momenty dielektrik s částečně proměnnými (měkkými) dipóly se nejen orientují vlivem pole, ale mění i svou hodnotu, neboť přiložením elektrického pole dochází také u těchto dielektrik k posuvu elektrických nábojů uvnitř molekuly.
- *Nepolární dielektrika* – molekuly nepochárních dielektrik za nepřítomnosti pole nemají dipólové momenty, náboje jsou rozloženy souměrně. Molekuly nabývají dipólových momentů teprve v elektrickém poli. Polarizace nepochárních dielektrik se nazývá elektronová.
- *Piezelektrický jev* – elektrická polarizace, která vzniká při stlačení nebo roztahení pevného dielektrika tvořeného polárními molekulami, se nazývá piezelektrický jev. Naproti lehlých stranách destičky z piezelektrického dielektrika (piezelektrika) vzniknou nestejněměrné náboje.
- *Feroelektrika* – látka s velkými hodnotami permeability (permeabilita je schopnost prostředí magnetizovat se), která je závislá na elektrickém poli. V krystalech feroelektrik existují oblasti zvané domény v kterých jsou dipólové momenty orientovány stejným směrem i za nepřítomnosti vnějšího pole. Ve vnějším poli se domény postupně orientují ve směru pole. To vysvětluje veliké hodnoty permitivity a její závislost na elektrickém poli. Při určité teplotě dochází k rozrušení orientace dipólových momentů v doménách a látka ztrácí feroelektrické vlastnosti. [5, 12, 16]

2.5. Chemická vazba a vodivost pevných látek

Vlastnosti elektronů a iontů v pevných látkách jsou určovány především vzájemným působením atomů vytvářejících pevnou látku. Vazební síly v krystalu jsou určeny chemickou vazbou, která se tak stává určujícím činitelem pro elektrické, tepelné, magnetické a další vlastnosti látky. Kvantová teorie chemické vazby vychází z předpokladu, že atomy vytvářejí molekuly, nebo krystaly jen tehdy, zmenšuje-li se při jejich vzniku celková energie soustavy. Chemické

vazby se účastní elektrony valenční sféry jednotlivých atomů. Při jejich dostatečně těsném přiblížení dochází ke vzájemné interakci. Podle druhu vzájemné interakce valenčních elektronů vzniká **chemická vazba**, jejíž charakter a velikost určuje rozložení atomů v prostoru i charakteristické vlastnosti materiálu. Tyto vztahy názorně vyjadřuje následující zjednodušené schéma (obr. 6).



Obr. 6: Chemická vazba a vodivost pevných látek

Schéma zjednodušuje situaci, neboť pro složitější strukturu valenční sféry elektronového obalu vznikají složené vazby, které podstatněji komplikují strukturu materiálů i jejich vlastnosti. [19]

Druhy vazeb

Primární

- *Kovová vazba*
- *Kovalentní vazba*
- *Iontová vazba*

Nevazebné interakce (sekundární vazby):

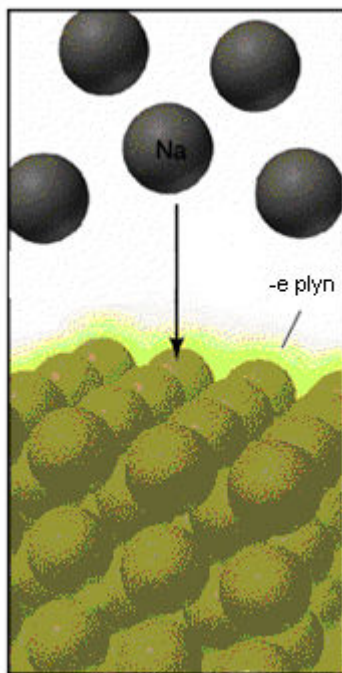
- *Vodíkové můstky*
- *Van der Waalsovy síly*

2.5.1. Primární vazby

Kovová vazba

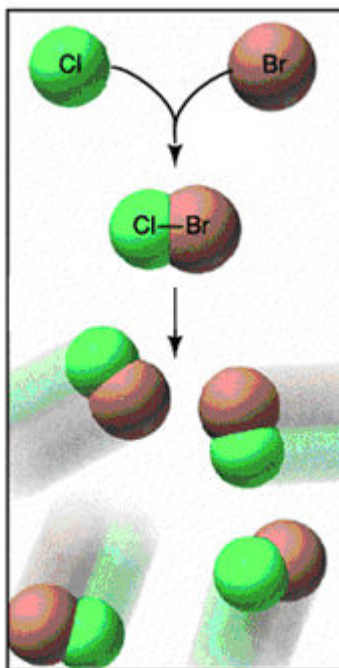
Prvky, které mají ve valenční sféře atomového obalu malý počet elektronů se vyznačují tím, že tyto elektrony jsou slabě vázány k jádru atomu. Sblíží-li se atomy uvažovaného prvku na dostatečně krátkou vzdálenost (desetiny nanometru), takže se energeticky dostupné orbitály začnou překrývat, dojde ke sdílení valenčních elektronů mezi atomy. V tomto případě nevzniká směrová vazba, takže sdílené elektrony se mohou více méně volně pohybovat mezi kladně nabitými ionty atomů a vytvářejí jakýsi elektronový plyn, který kompenzuje svým záporným nábojem kladný náboj iontů mřížky. Tento druh vazby nazýváme vazbou kovovou. Významná podmínka pro vznik kovové vazby je co nejtěsnější uložení atomů v prostoru. Existence elektronového plynu v kovové mřížce je příčinou velké elektrické a tepelné vodivosti kovů, jejich neprůsvitnosti a vysokého lesku, jakož i snadné tváritelnosti, tedy vlastností charakterizujících kovy.

Zvláště velkou elektrickou a tepelnou vodivostí se vyznačují kovy s jedním valenčním elektronem jako Ag, Cu, Au, K nebo Na, protože valenční elektrony jsou v tomto případě slabě vázány. Tepelný pohyb krystalové mřížky vyvolává lokální fluktuace vnitřního elektrického pole, které potom podmiňují další pohyb elektronů v mřížce. Čím bude vyšší teplota krystalové mřížky, tím budou větší fluktuace vnitřního elektrického pole, a tím bude kratší volná dráha téměř volných elektronů elektronového plynu. To tedy znamená, že se u kovů bude se zvyšující se teplotou zmenšovat elektrická vodivost. Také poruchy v krystalové mřížce nedokonalých krystalů ovlivňují lokální fluktuace vnitřního elektrického pole, a tím i vodivost materiálu. Proto mají slitiny zpravidla menší vodivost než čisté kovy. [5, 19, 20]

**Obr. 7: Kovová vazba**

Kovalentní vazba

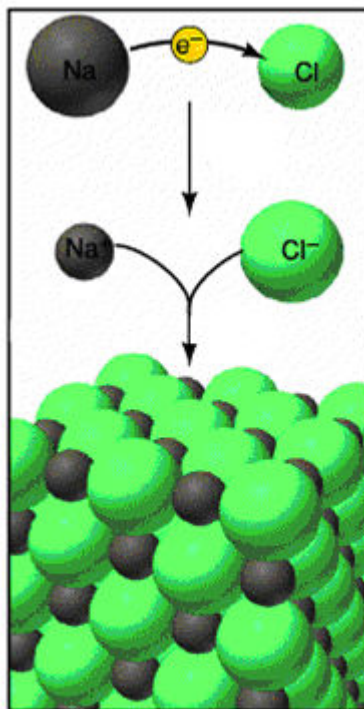
Tvořena současným sdílením elektronů dvěma atomy. Původ a charakter kovalentní vazby lze pochopit na základě kvantové mechaniky. Čím více se k sobě přibližují dva atomy, tím více se navzájem překrývají elektronové obaly těchto atomů a tím se vytváří pevnější vazba, protože se zmenšuje celková energie atomů. Stupeň překrytí je omezen jednak elektrostatickým odpuzováním obou atomů, jednak tím, že zaplněné orbitály valenčních elektronů se nemohou překrývat (Pauliho princip). Kovalentní vazba vytváří mezi sousedními atomy stabilní elektronový oktet tím, že se společně sdílí mezi jednotlivými atomy elektronový pár. Tato vazba je tedy podmíněna přítomností nepárových elektronů v jednotlivých valenčních orbitalech atomů. Maximální pravděpodobnost překrytí společných orbitalů je ve směru spojnice atomových jader. V tomto směru je vazba nejpevnější, což znamená, že kovalentní vazba je vazbou směrovou. Příkladem látek tvořících mřížku kovalentní vazbou jsou krystaly uhlíku ve formě diamantu, germanium, křemík atd. Stabilita kovalentní vazeb se zmenšuje se zvětšujícím se atomovým číslem prvků. [5, 19, 20]



Obr. 8: Kovalentní vazba

Iontová vazba

Podmíněna přitažlivými elektrostatickými silami, které působí mezi nesouhlasně nabitými ionty a vytváří se mezi atomy se značně rozdílným počtem valenčních elektronů. Protože v souboru iontů každý pozitivní iont přitahuje všechny sousední negativní ionty a naopak, nemůže být iontová vazba směrová. Počet vzájemných vazeb je omezen jednak geometrickým faktorem, který souvisí s nutností co nejtěsnějšího uspořádání krystalové mřížky, jednak s požadavkem elektrické neutrality objemu iontového krystalu. Proto jsou iontové krystaly při pokojových teplotách izolanty a získávají elektrickou vodivost teprve při vyšších teplotách, při kterých tepelná energie umožňuje přechod iontů z jedné mřížkové polohy do druhé. Vedení proudu za přítomnosti vnějšího elektrického pole je pak vázáno na transport hmoty - mluvíme o iontové vodivosti. Iontová vazba se uskutečňuje u alkalických halogenidů typu A^+B^- , například NaCl. [5, 19, 20, 21]

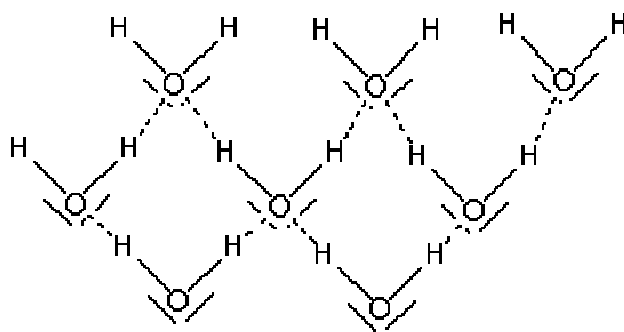


Obr. 9: Iontová vazba

2.5.2. Sekundární vazby (nevazebné interakce)

Vodíkové můstky

Vedle uvedených primárních vazeb, které mají rozhodující význam, se mohou v pevných látkách uplatnit ještě sekundární vazby projevující se mnohem slabší intenzitou. Kovalentně vázané atomy tvoří často molekuly, které se chovají jako trvalé dipóly. Nejznámějším příkladem je molekula vody. Jelikož elektrony sdílené mezi atomy kyslíku a vodíku se většinu času nacházejí mezi oběma atomy, převažuje na straně atomu kyslíku negativní a na straně vodíku pozitivní konec elektrického dipólu. Pozitivní konce se snaží přitáhnout negativní konce jiných dipólů, čímž jsou molekuly vzájemně svázány. Tento typ vazby se uplatňuje i u jiných sloučenin vodíku a označuje se jako vodíková vazba, neboli vodíkový můstek. [5, 19]



Obr. 10: Příklad vodíkového můstku mezi molekulami vody (čárkovaně jsou vyznačeny vodíkové vazby)

Van der Waalsovy síly

Jiný druh sekundární vazby vzniká jako důsledek pohybu elektronů v obalu atomu. Pohybem elektronů v obalu se mění těžiště záporného náboje obalu vzhledem ke kladnému náboji jádra, čímž se vytváří fluktuující elektrický dipól. Vzájemným působením sousedních dipólů vznikají vazebné síly, které se označují jako Van der Waalsovy vazebné síly. Působením Van der Waalsových sil se seskupují nejčastěji molekuly a vytvářejí molekulové krystaly, které tvoří například cukr nebo parafín.

Uvedené typy vazeb představují ideální mezní případy. Ve skutečnosti se však různé typy překrývají, takže se reálné látky tvoří součinností několika typů vazeb. Určit jejich typ a podíl v dané látce je velmi obtížné. U polovodičů jde zpravidla o kovalentní vazbu s částečnou iontovou vazbou. V tomto případě mluvíme o tzv. polárních polovodičích. Příkladem polárního polovodiče je např. GaAs. Podíl iontové vazby lze nejčastěji určit podle rozdílu elektronegativity zúčastněných atomů v elementární buňce. Elektronegativitou rozumíme schopnost atomu přitahovat elektrony, takže alkalické kovy, které jsou v první skupině periodické soustavy prvků, mají malou elektronegativitu, prvky na pravé straně, např. halogeny, mají elektronegativitu velkou. [19]

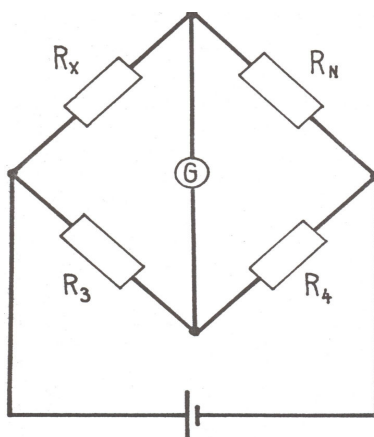
2.6. Měření elektrizovatelnosti textilií

V důsledku vysokého elektrického odporu textilních materiálů dochází jak v textilním průmyslu, tak při nošení oděvů ze syntetických vláken k řadě problémů v souvislosti s výskytem elektrostatického náboje. Z praktického hlediska má největší význam tzv. triboelektrizovatelnost (tj. vznik elektrického náboje třením), kdy pomocí triboelektrizačních

přístrojů sledujeme v závislosti na čase jak postupné nabíjení textilie nebo svazku vláknem třením až do nasyceného stavu, tak jejich vybíjení.

Současně s nabíjením textilie vždy dochází k odvodu náboje do okolí, tj. k vybíjení. Tento děj je ovlivněn zejména vlhkostí vzduchu, vlhkostí měřeného materiálu a jeho dalšími vlastnostmi. Elektrostatická měření proto vyžadují přísnou klimatizaci. Nejvýhodnější je měřit za takových podmínek, za jakých dochází k maximální elektrizaci, tj. při co nejnižší relativní vlhkosti vzduchu ($\varphi = 20 - 30 \%$), kdy je možno lépe rozlišit rozdílný sklon materiálů k nabíjení. Tyto podmínky jsou dosti vzdáleny standardním podmínkám v textilních provozech i textilních zkušebnictví ($t = 20^\circ\text{C}$, $\varphi = 65 \%$). Přihlédneme-li navíc k tomu, že po většinu roku je technicky náročné docílit nízkých hodnot vlhkosti vzduchu, je pro elektrostatická měření doporučována 40% vlhkost vzduchu jako užitečný kompromis.

K popisu schopnosti dané látky vést elektrický proud se používá veličina měrná vodivost γ . Odpor špatných vodičů, polovodičů a špatných izolátorů se zjišťuje pomocí zapojení Wheastonova můstku (obr 11). [6]



Obr.11: Wheastonův můstek

Nastavíme-li odpory R_3 a R_4 tak, aby galvanoměrem neprocházel proud, určí se odpor z následujícího vztahu:

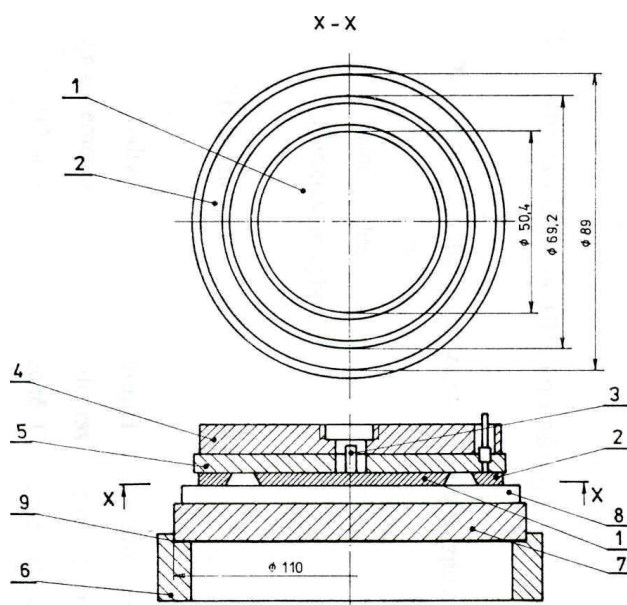
$$R_x = R_N \frac{R_3}{R_4} \quad (9)$$

R_N ...normálový odpor [Ω]

2.7. Způsob měření anizotropie elektrické rezistivity materiálů a zařízení k jeho provádění

U celé řady materiálů je žádoucí zjištění anizotropie jejich elektrických vlastností, zejména u materiálů, u kterých jejich anizotropie ovlivňuje jejich výsledné elektrické vlastnosti, jako jsou např.: textilie s vodivými vlákny, kompozity s rastrem, povrchy s různou gravurou, vrapové povrchy atd..

Dosavadní normovaná metoda měření elektrické rezistivity materiálů využívá dvojici měřících elektrod, z nichž jedna má tvar kruhu a druhá tvar mezikruží (obr.12). Obě měřící elektrody jsou při měření položeny na měřeném vzorku, přičemž kruhová měřící elektroda je situována uvnitř měřící elektrody ve tvaru mezikruží. Kruhová měřící elektroda má od stěn měřící elektrody odstup, tj. mezi oběma měřícími elektrodami je mezera rovněž ve tvaru mezikruží. Měřící elektrody jsou připojeny ke zdroji elektrického napětí a měří se elektrický odpor mezi nimi. Takto zjištěná hodnota popisuje komplexní povrchovou elektrickou rezistivitu materiálu, avšak neumožňuje zjištění anizotropie elektrické rezistivity materiálu, tj. zjištění rozdílnosti elektrické rezistivity materiálu v různých směrech vůči povrchu materiálu. Toto je hlavní nevýhodou dosavadního stavu techniky měření. [8]



Obr.12: Dosavadní stav techniky pro měření elektrické rezistivity - 1...vnitřní kruhová elektroda, 2...prstencová elektroda, 3...koaxiální konektor, 4...třecí deska, 5...izolační deska, 6...izolační válec, 7...podložní elektroda, 8...vzorek, 9...izolační vrstva

Zařízení k měření anizotropie elektrické rezistivity materiálů, použité k této práci, obsahuje dvojici měřících elektrod se vzduchovou mezerou, které se přiloží na měřený materiál a měří se elektrický odpor mezi měřícími elektrodami. Následně se z naměřených hodnot určí elektrická rezistivita povrchu měřeného materiálu.

Způsob měření anizotropie elektrické rezistivity materiálů, spočívá v tom, že mezi měřícími elektrodami se vytvoří lineární vzduchová mezera a elektrická rezistivita povrchu měřeného materiálu se zajišťuje v minimálně dvou rozdílných směrech. Z hodnot elektrické rezistivity povrchu měřeného materiálu zjištěných v různých směrech povrchu měřeného materiálu se určí anizotropie povrchové elektrické rezistivity měřeného materiálu. Podstata zařízení spočívá v tom, že vzduchová mezera je tvořena lineární vzduchovou mezerou a měřící elektrody jsou uloženy společně, otočně okolo osy kolmé na rovinu dosedacích ploch měřících elektrod na měřený materiál. Tímto je jednoduše, rychle a přesně zjistitelná anizotropie povrchové rezistivity měřeného materiálu. [8]

Výhodné provedení při měření:

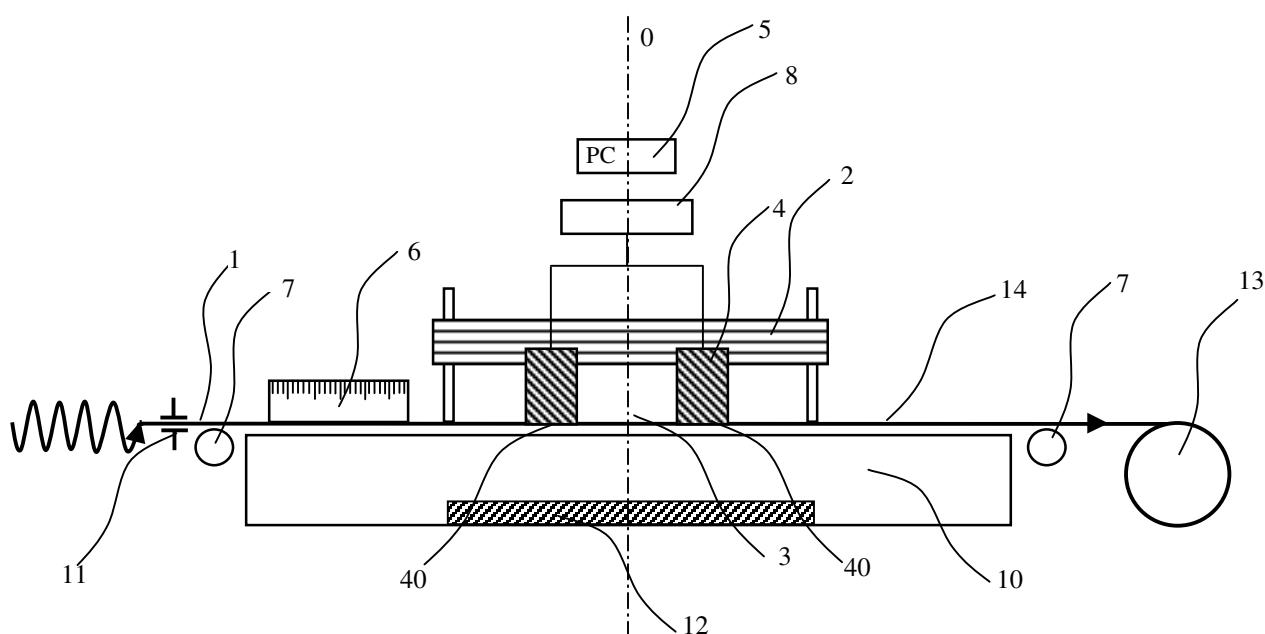
- Pro zlepšení reprezentativnosti naměřených hodnot je výhodné, jestliže se před zahájením měření stabilizují parametry měřeného materiálu.
- Měřící elektrody pevně uloženy v otočném držáku a je jim přiřazeno odměřovací ústrojí úhlu jejich natočení.
- Mají-li měřící elektrody obdelnikový půdorys a jsou uspořádány představitelně vůči rovině povrchu měřeného materiálu a vůči sobě.

2.7.1. Popis přístroje

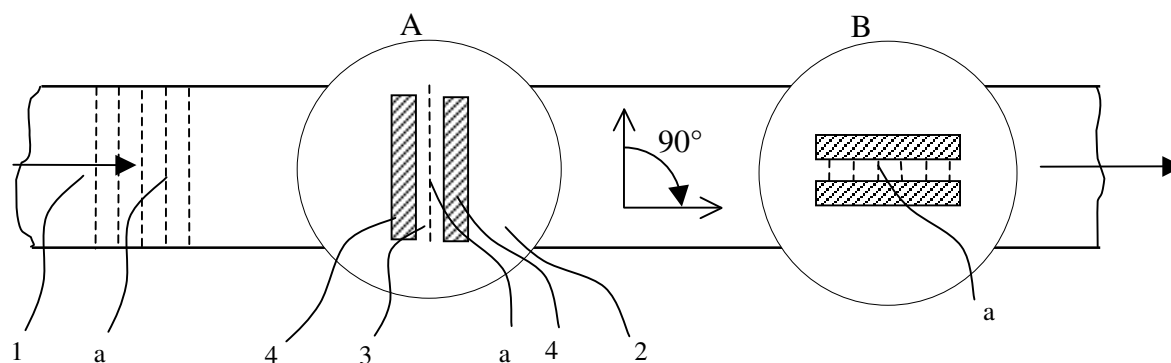
Přístroj pro měření anizotropie rezistivity materiálů obsahuje dvě měřící elektrody (obr. 13), které jsou paralelně uspořádány. Jejich vzdálenost, tzv. měřící štěrba je variabilní v rozsahu 10 až 60 mm s krokem 10 mm. Pro měření povrchové rezistivity materiálu se měří rezistivita povrchu materiálu mezi elektrodami (obr. 13). K měření objemové rezistivity materiálu se měří mezi elektrodami a elektrodou pro měření objemové rezistivity. Elektrody jsou upevněny na držáku elektrod, který umožňuje jejich otočení o 90° a tím může dojít k měření anizotropie rezistivity materiálu (jak povrchové, tak při zapojení elektrody objemové).

Přehled obrázků

Přístroj je popsán na obrázcích 13 až 16. Na obrázku 13 je schematicky znázorněn přípravek pro měření anizotropie rezistivity materiálů. Obrázek 14 uvádí příklad pozice vodivých vláken (resp. textilie bez vodivých vláken) vzhledem k pozici natočení elektrod. Obrázky 15 a 16, na obrázku 15 je zaveden souřadnicový systém měření, obrázek 16 popisuje vyhodnocení měření pomocí komplexních čísel. Na obrázku 17 je uveden příklad předpokládané symetrie naměřených rezistivit pro textilie. [8]

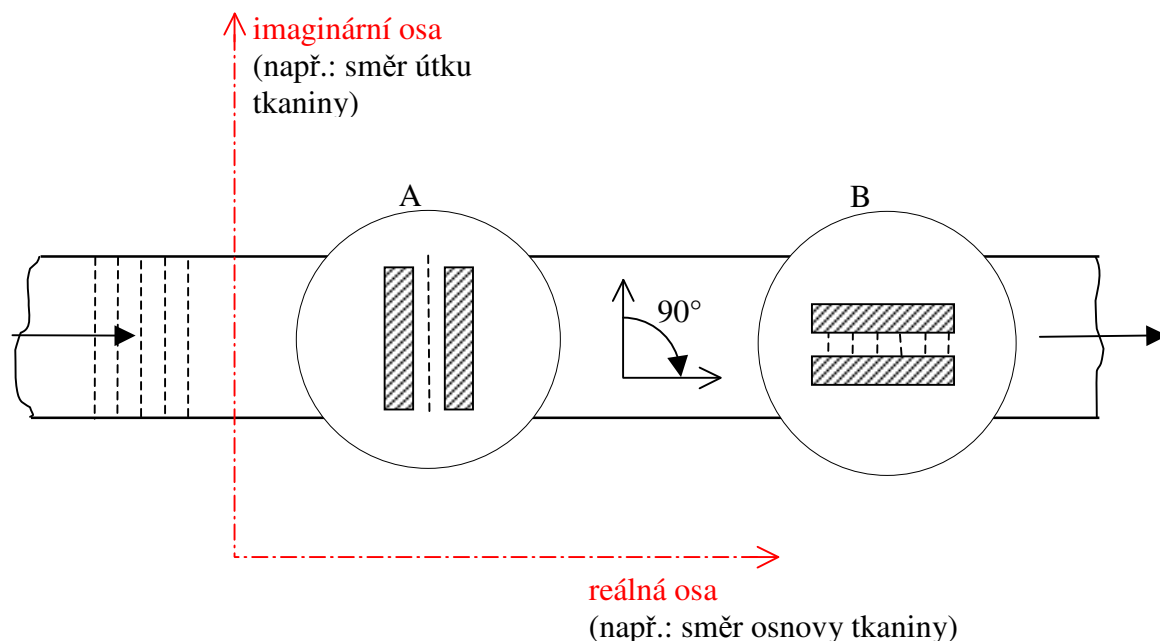


Obr. 13: Přípravek pro měření anizotropie rezistivity materiálů



Obr. 14: Příklad: Pozice vodivých vláken v měřicí štěrbině s pootočením elektrody o 90° - 0 - osa otáčení měřících elektrod, 1 - měřený materiál, 2 - otočný držák měřících elektrod, 3 - vzduchová mezera (rozměr: 10 až 60 mm), 4 - měřící elektroda (tvrdě chromovaná mosaz), 5 - osobní počítač, 6 - stupnice posunu měřeného materiálu, 7 - šířková rozpínka, 8 - specializovaný měřicí přístroj pro měření elektrického odporu, 10 - izolační podložka, 11 - brzdička regulující napětí materiálu, 12 - třetí elektroda (tvrdě chromovaná mosaz), 13 - navíjecí válec, 14 - rovina povrchu měřeného materiálu, 40 - dosedací plocha měřící elektrody, a - vodivé vlákno (uhlíkové nebo kovové)

Metodika měření a vyhodnocení výsledků měření na přípravku pro měření anizotropie povrchové a objemové rezistivity materiálů



Obr. 15: Příklad: Souřadnicový systém přípravku pro měření antistatických parametrů anizotropních plošných textilií

Metodika měření

Pomocí digitálního multimetru a přípravku pro měření anizotropie elektrických vlastností textilií budou naměřeny *absolutní hodnoty* $|x_i|$ povrchové rezistivity $[\Omega]$ a objemové rezistivity $[\Omega \cdot \text{m}^{-1}]$ materiálu.

Po provedení měření budeme tedy znát: absolutní hodnotu měřené veličiny a úhel natočení elektrod. Pro další vyhodnocování si naměřená data vyjádříme ve tvaru komplexní čísel:

$$X_i = a_i + jb_i \quad (10)$$

kde a, b jsou reálná čísla a j je imaginární jednotka. Pro imaginární jednotku platí:

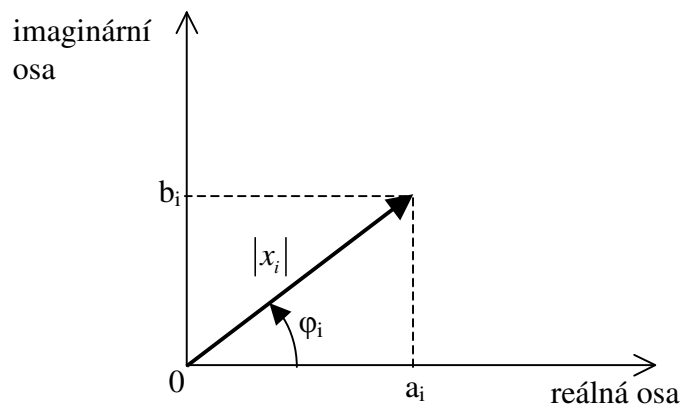
$$j^2 = -1, \quad j^3 = -j, \quad j^4 = 1 \quad (11)$$

Lze použít goniometrického vyjádření komplexních čísel:

$$X_i = |x_i| e^{j\varphi_i} \quad (12)$$

Odvození goniometrického vyjádření:

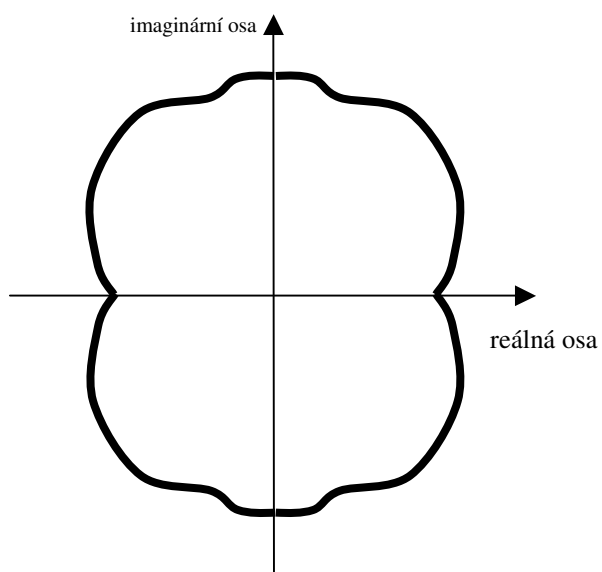
$$X = a + jb = |x| \cdot (\cos \varphi + j \cdot \sin \varphi) = |x| \cdot e^{j\varphi} \quad (13)$$



Obr. 16: reálná osa – osa x, kterou v případě tkaniny představuje směr osnovy tkaniny (pro případ pletenin je to směr sloupků)

imaginární osa – osa y, v případě tkaniny tedy směr útku tkaniny (pro pleteniny je to směr řádků)

Teoreticky lze předpokládat určitou symetrii měření (obr. 17)



Obr.17: Příklad očekávané symetrie pro textilie

3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

3.1. Popis experimentu

- 1) V experimentu byly použity tkaniny s keprovou vazbou K2/1, do kterých byla zatkána vodivá vlákna s variabilní roztečí, proto bylo nutné provést označení vzorků závislé na rozteči vodivých vláken ve směru útku a osnovy. Pro lepší dokazatelnost funkčnosti přípravku byly podrobeny měření také textilie Vektron a Spolsin (kapitola 3.2.).
- 2) Anizotropie rezistivity vláken byla měřena pro čtyři různé vzdálenosti elektrod ($l_1 = 1\text{cm}$, $l_2 = 2\text{cm}$, $l_3 = 4\text{cm}$ a $l_4 = 6\text{cm}$). Ve všech vzdálenostech byly měřeny hodnoty v oblasti úhlů 0° až 90° .
 0° ...elektrody nastaveny se směrem paralelním s osnovou
 90° ... elektrody nastaveny se směrem paralelním s útkem
Během měření byly hodnoty vlhkosti ovzduší v rozmezí $\varphi=30-35\%$ a hodnoty teploty laboratoře $t=22-24^\circ\text{C}$.
- 3) K tomu, aby byl získán další parametr potvrzující funkčnost přípravku, byla také měřena elektrická rezistence textilních vzorků v úhlech od 0° do 360° , ale pouze se vzdáleností elektrod $l_4 = 6\text{cm}$. Tyto hodnoty byly porovnány s výsledky měření pro úhly $0^\circ - 90^\circ$.

3.2. Popis použitých vzorků

V experimentu byly použity tkaniny se stejnou vazbou K 2/1, dostavou osnovy (485 nití/10 cm) a útku (320 nití/10 cm), pro trvalou antistatickou úpravu bylo použito stejné vodivé vlákno zn. Rezistat, které bylo zatkáno s variabilní roztečí, popis tohoto zatkáání je uveden i s označením vzorků v tabulce I. Množství antistatik v jednotlivých vzorcích jsou znázorněny v tabulce II.

Tabulka I: Popis použitých vzorků textilií

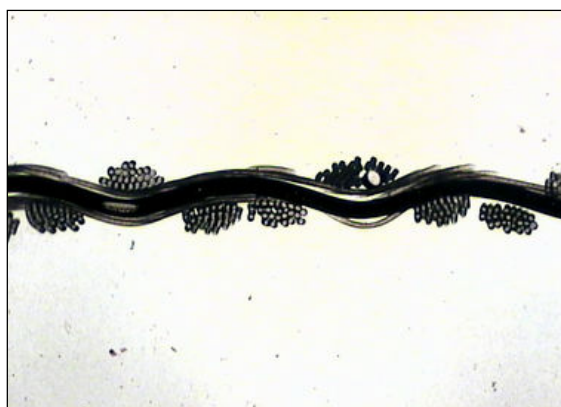
Označení vzorku		Rozteč vodivých vláken v útku [mm]			
		5	10	13	bez
Rozteč vodivých vláken v osnově [mm]	5	1a	2a	3a	4a
	10	1b	2b	3b	4b
	13	1c	2c	3c	4c
	bez	1d	2d	3d	4d

Tabulka II: Množství antistatických vláken v jednotlivých vzorcích

Podíl vodivých vláken [%] [*]		Rozteč vodivých vláken v útku [mm]			
		5	10	13	bez
Rozteč vodivých vláken v osnově [mm]	5	1,0	0,72	0,65	0,5
	10	0,72	0,5	0,4	0,24
	15	0,65	0,4	0,32	0,16
	bez	0,5	0,24	0,16	0

^{*} hmotnostní procenta udávaná výrobcem

Na obrázcích 18a a 18b je, pro představu o vzhledu tkaniny, uveden příčný řez tkaninou s antistatickým vláknem.



Obr.18a): řez osnovou



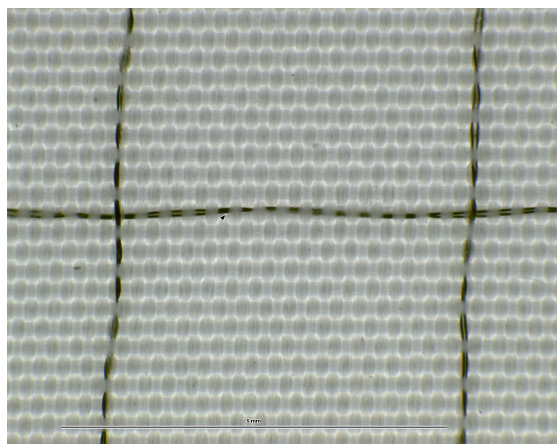
Obr.18b): řez útkem

(Obrázky řezů textilií byly pořízeny na obrazové analýze Lucia G.)

Textilie Vektron a Spolsin

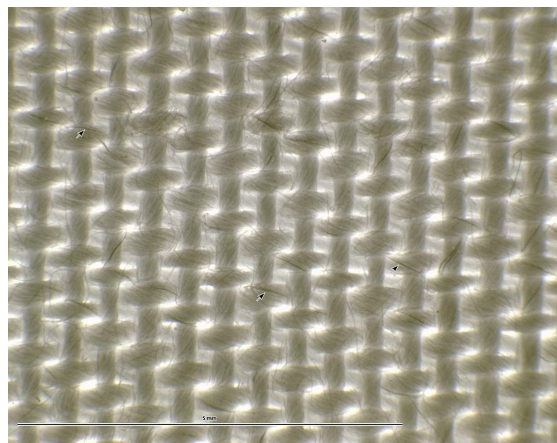
Pro porovnání funkčnosti přípravku byly podrobeny měření i vzorky Vektron a Spolsin, které jsou směsí PES a uhlíkových vláken.

Vektron: textilie tvořená plátňovou vazbou, do které je zatkáno uhlíkové vlákno značky Beltron s roztečí 5 x 5 mm (obr.19)



Obr.19: pohled na vzorek Vektron

Spolsin: vazbou této textilie je třívazný osnovní kepr K 2/1 a uhlíkové vlákno bylo použito přímo ve směsi PES materiálu (obr.20)



Obr.20: pohled na vzorek Spolsin

3.2.1. Použité vodivé vlákno

Pro posouzení vlivu obsahu a rozteče vodivého vlákna v textilií byla použita příze vždy se třemi nekonečnými vlákny RESISTAT F 901 / 022 firmy BASF, nyní dodávané firmou

SHAKESPEARE, England. V programu firmy jsou dva typy vláken, která se rozlišují rozdílným postupem zvlákňování.

Carbon Suffusion Process - uhlíkové pigmenty jsou pomocí speciálního postupu uloženy na povrch vlákna.

Melt Spun - Při zvlákňování jsou uhlíkové pigmenty umístěny do jádra vlákna.

RESISTAT Carbon suffused

uhlíkové pigmenty jsou chemicky vázány v povrchu PAD vlákna

- vodivá PAD vlákna a hedvábí s velmi dobrou permanencí
- elektrická vodivost nezávisí na relativní vlhkosti vzduchu
- schopnost znovuzotavení a textilní vlastnosti jako u běžných PAD textilních přízí
- žádné opadávání nebo oxidace vodivé vrstvy
- vynikající povrchová vodivost vlákna, jelikož uhlíkové pigmenty nejsou obaleny uzavřenou polymerní vrstvou
- oděruvzdorná vodivá vrstva, jelikož není povrstvena povrchově uhlíkem, ale pigmenty jsou vloženy do polymeru
- textilní charakter, odstávající vlákna nepoškozují pokožku
- neovlivňuje elektrický odpor lidské kůže
- zabraňuje přilnavosti prachu a chloupků, zabraňuje přilnavosti textilií s rozdílným vlákenným složením a tvorbě jisker díky elektrostatickému náboji

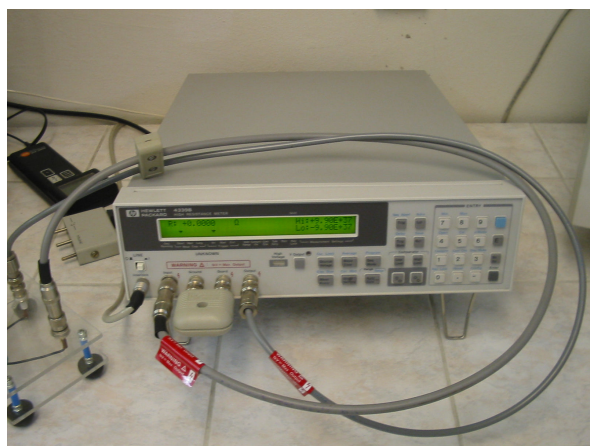
RESISTAT F 901 / 022 (vlákno použité v tomto experimentu)

F 901 / 022 je PAD 6.6 monofilament s elektricky vodivou uhlíkovou vrstvou na povrchu (1/1000 mm). Vláknem je černé a má kruhový průřez.

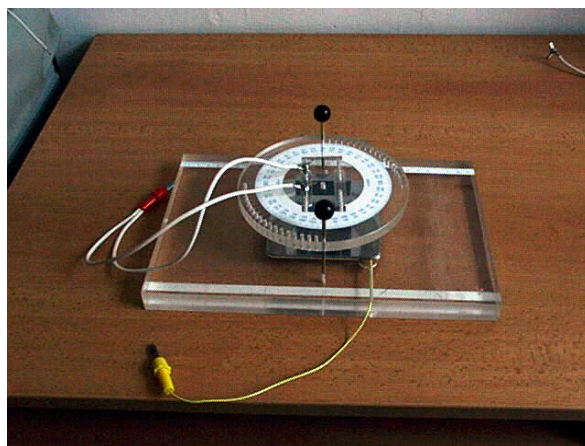
Jemnost	2,4 dtex
Poměrná pevnost	3,7 g / dtex
Tažnost	41 %
Rezistivita (měrný odpor)	$2,1 \cdot 10^5$ ohm / cm / filament

3.3. Popis měření

U textilií byla anizotropie rezistivity měřena na zařízení skládající se z přístroje Hewlett Packard 4339-B (obr.21) a přípravku pro měření anizotropie elektrických vlastností (obr.22). Během experimentu se hodnoty relativní vlhkosti ovzduší a teploty pohybovaly v rozmezí $\varphi=30-35\%$ resp. $t=22-24^{\circ}\text{C}$. Obě hodnoty byly zjišťovány pomocí elektronického měřáku umístěného v laboratoři.



Obr.21: Přístroj HP 4339-B



Obr.22: Soustava elektrod a přípravek

3.3.1. Přesnost měření

Výpočet chyby měření dle výrobce měřícího přístroje:

$$e = 0,68 + \left(\frac{100 \cdot U_m + 7,5 \cdot 10^{-6} R_m}{U_s} \right), \quad (14)$$

kde: U_m ... napětí 0,1V, pokud je zkušební napětí do 200V

U_s ... zkušební napětí [V]

R_m ... naměřená hodnota rezistence [Ω , Ωm]

e ... chyba měření

Příklad: $U_m=0,1\text{V}$; $U_s=100\text{V}$; $R_m=6,86 \cdot 10^6 \Omega$

$$e = 0,68 + \left(\frac{100 \cdot 0,1 + 7,5 \cdot 10^{-6} \cdot 6,86 \cdot 10^6}{100} \right) = 1,2945 \Omega$$

Při zaokrouhlení na dvě desetinná místa je chyba zaokrouhlení mnohem větší než chyba měření, také variabilita hodnot elektrických vlastností textilních materiálů vzhledem k jejich **nehomogenitě** a velkému podílu vzduchu je značně vysoká, z těchto důvodů nebudeme dále chybu měření uvažovat. [17]

3.3.2. Měření

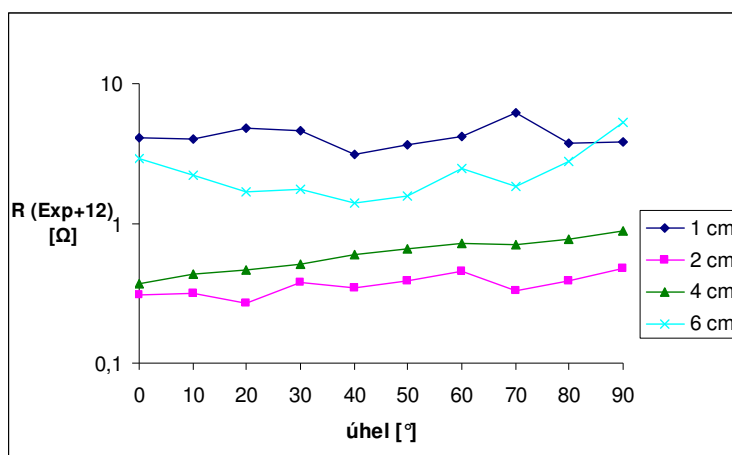
Z každého typu tkaniny bylo proměřeno 10 kusů vzorků. Z výsledků byla spočítána průměrná hodnota v jednotlivých směrech. Ze získaných dat a pomocí skriptu (tab.3) použitým v programu Matlab byly získány grafy popisující anizotropii rezistivity (obr.23). Skript byl nastaven tak, aby vykresloval křivku v rozmezí 0° až 360° , respektive hodnoty naměřené v oblasti od 0° do 90° byly symetricky převráceny podle středového bodu. Pro vykreslení funkce a vyhodnocení statistických dat naměřených hodnot (tab.4) povrchového odporu byl použit program Microsoft Excel.

Tabulka III: skript Matlab

<code>t = 0:pi/18:2*pi;</code>
<code>r=[2.0025*10^5 1.9152*10^5 3.4591*10^5 3.7453*10^5</code>
<code>5.1047*10^5 6.1099*10^5 7.5484*10^5 1.1661*10^10 2.2816*10^10</code>
<code>2.5908*10^10];</code>
<code>r=log(r);</code>
<code>pom=r(1,1:end-1);</code>
<code>pom=fliplr(pom);</code>
<code>vektor=[r pom];</code>
<code>vekl=vektor(1,2:end);</code>
<code>VEK=[vektor vekl];</code>
<code>polar(t,VEK,'-r')</code>

3.3.3. Naměřené hodnoty anizotropie rezistivity

Graf na obrázku 23 vykresluje naměřené hodnoty rezistence (tab.4) pro vzorek Vektron. Na ose x byly vyneseny úhly, na kterých bylo měření prováděno a osa y zobrazuje naměřenou rezistenci. V grafu je nulový stupeň (0°) směr elektrod rovnoběžně se směrem osnovy, tedy měříme vodivost útku a 90° je směr elektrod rovnoběžně se směrem útku a měříme tak vodivost osnovy. V grafu byly znázorněny výsledky ve všech čtyřech vzdálenostech elektrod.



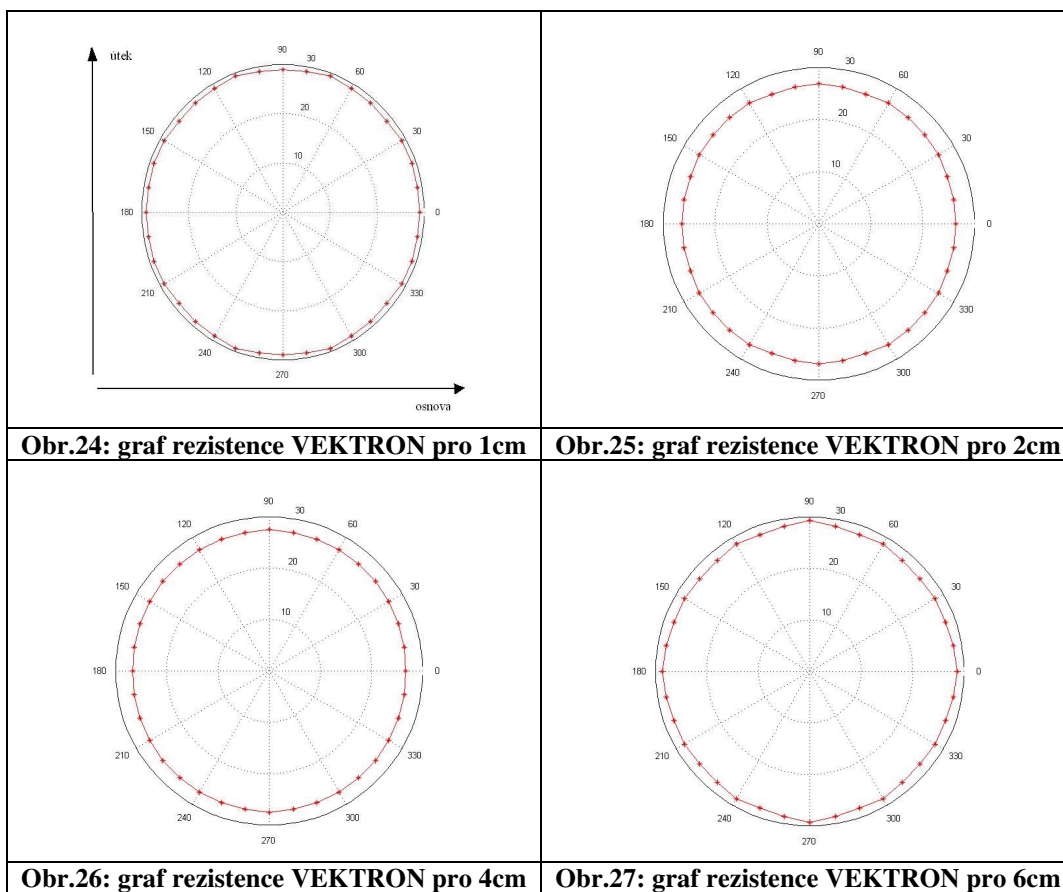
Obr.23: vzorek 1 - VEKTRON

Z grafu je patrné, že ve vzorku Vektron je rezistence ve všech směrech obdobná, což je důsledkem plátňové vazby.

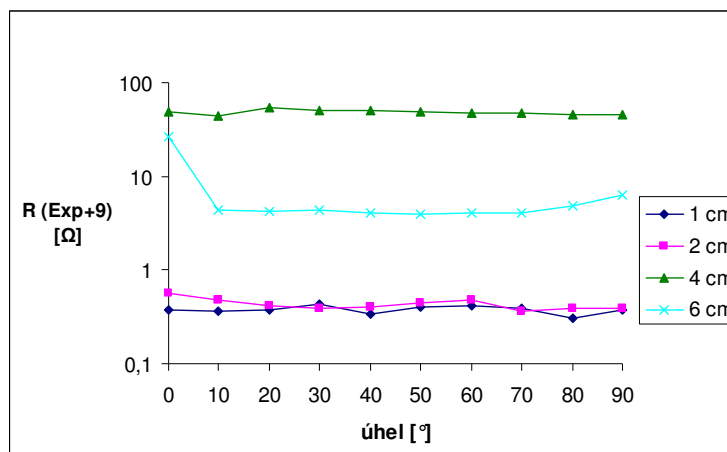
Tabulka IV: naměřené hodnoty pro vzorek 1 - VEKTRON

		vzdálenost elektrod (cm)			
Exp = 10^{12}		1cm	2cm	4cm	6cm
VEKTRON	0	4,0805	0,30618	0,3686	2,8969
úhly (°)	10	3,9766	0,31495	0,43649	2,187
	20	4,7824	0,27049	0,46381	1,672
	30	4,5439	0,37629	0,50489	1,7436
	40	3,0851	0,34332	0,59588	1,4026
	50	3,6517	0,38937	0,65659	1,5502
	60	4,2154	0,45508	0,71777	2,4498
	70	6,1437	0,32932	0,69781	1,8523
	80	3,7523	0,38474	0,76436	2,7608
	90	3,8393	0,47305	0,88779	5,2169

Grafy na obrázcích 24 – 27 nám umožňují porovnat naměřené hodnoty vzorku Vektron v jednotlivých vzdálenostech elektrod. Pro lepší orientaci jsou na obrázku 24 pomocí os nastíněny směry, ve kterých byla měření prováděna.



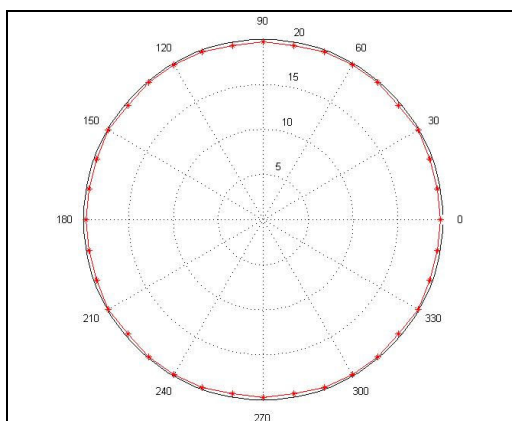
Vzorek Spolsin je zástupcem tkaniny s keprovou vazbou, kde vodivé vlákno bylo použito ve směsi materiálu. Vodivá vlákna jsou tedy rozmístěna rovnoměrně v celé tkanině a vazba na izotropní elektrické vlastnosti nemá vliv. Na obrázku 28 je vidět, že jsou hodnoty ve všech měření srovnatelné, tudíž elektrické vlastnosti jsou izotropní.



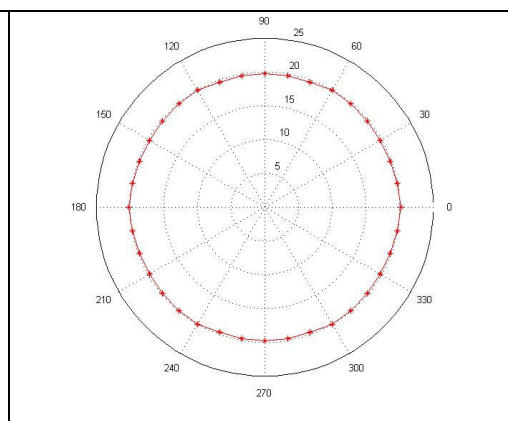
Tabulka V: naměřené hodnoty pro vzorek 2 – SPOLSIN

		vzdálenost elektrod (cm)			
Exp = 10 ⁹		1cm	2cm	4cm	6cm
SPOLSIN	0	0,37667	0,56342	48,114	26,94
úhly (°)	10	0,36351	0,4779	44,153	4,3502
	20	0,38186	0,41108	53,536	4,1678
	30	0,43462	0,39113	49,866	4,3329
	40	0,3421	0,4017	49,887	4,0811
	50	0,40785	0,44567	49,32	3,9934
	60	0,42435	0,47085	47,65	4,0665
	70	0,3888	0,36804	47,333	4,0184
	80	0,31134	0,38425	45,617	4,859
	90	0,37914	0,38421	45,046	6,3513

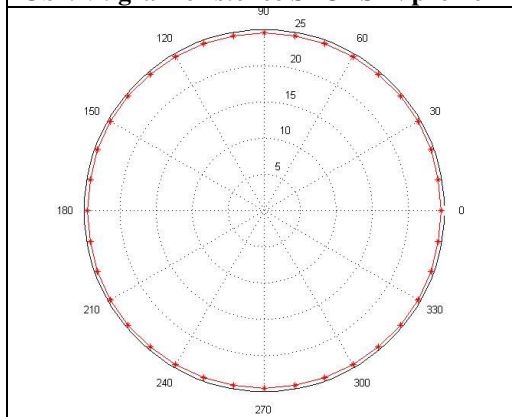
Grafy vzorku Spolsin zřetelně vykreslují izotropní vlastnosti nejenom ve všech úhlech měření, ale i ve všech vzdálenostech elektrod přípravku.



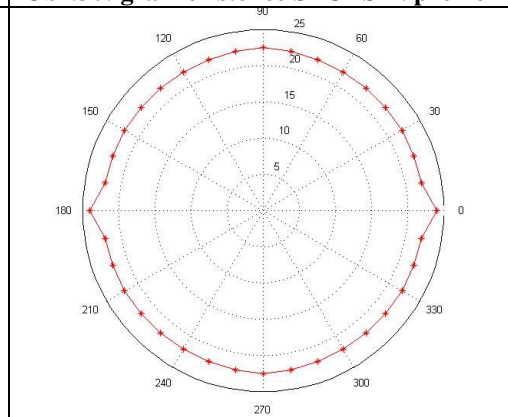
Obr.29: graf rezistence SPOLSIN pro 1cm



Obr.30: graf rezistence SPOLSIN pro 2cm

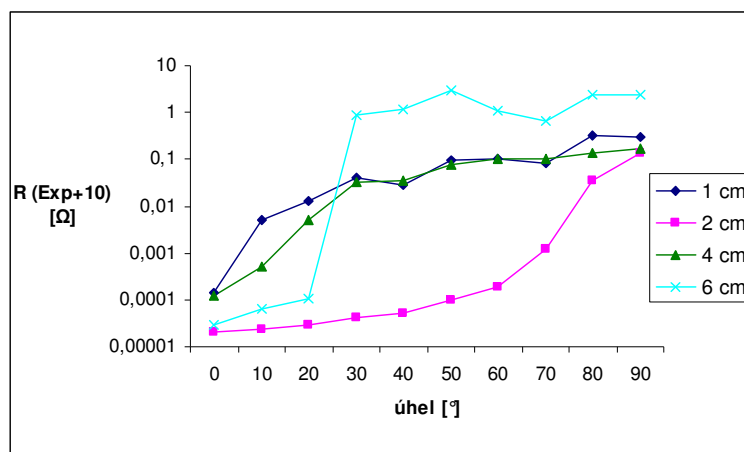


Obr.31: graf rezistence SPOLSIN pro 4cm



Obr.32: graf rezistence SPOLSIN pro 6cm

Na vzorku 1a je vidět vliv keprové vazby 2/1, která vede k nižším hodnotám ve směru osnovy (viz. podrobné vysvětlení na str. 48).

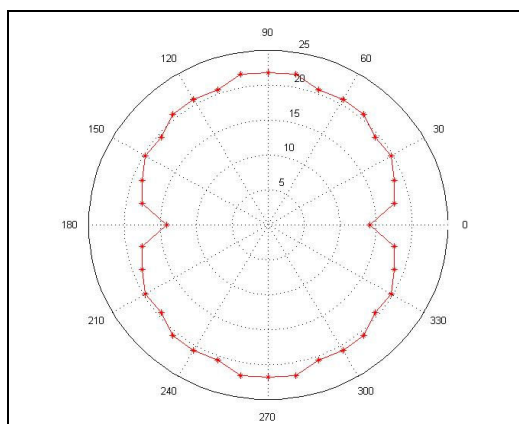


Obr.33: vzorek 1a

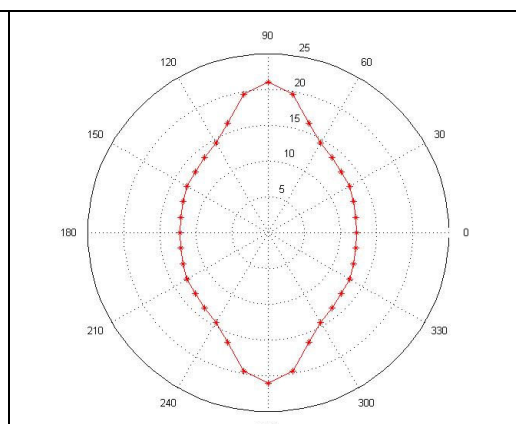
Tabulka VI: naměřené hodnoty pro vzorek 1a

		Vzdálenost elektrod (cm)			
Exp = 10 ¹⁰		1cm	2cm	4cm	6cm
1a	0	0,00013775	0,000020421	0,00012131	2,98E-05
	10	0,0051383	0,000023138	0,00052557	6,39E-05
	20	0,012953	0,000029984	0,0052189	0,000106
	30	0,039086	0,000042031	0,033018	0,89972
	40	0,02909	0,000053541	0,034033	1,1892
	50	0,094114	0,000098253	0,079073	2,8997
	60	0,1048	0,00018353	0,10479	1,1224
	70	0,084909	0,0012396	0,10012	0,6392
	80	0,31792	0,035227	0,13159	2,3514
	90	0,29574	0,14095	0,17318	2,3866

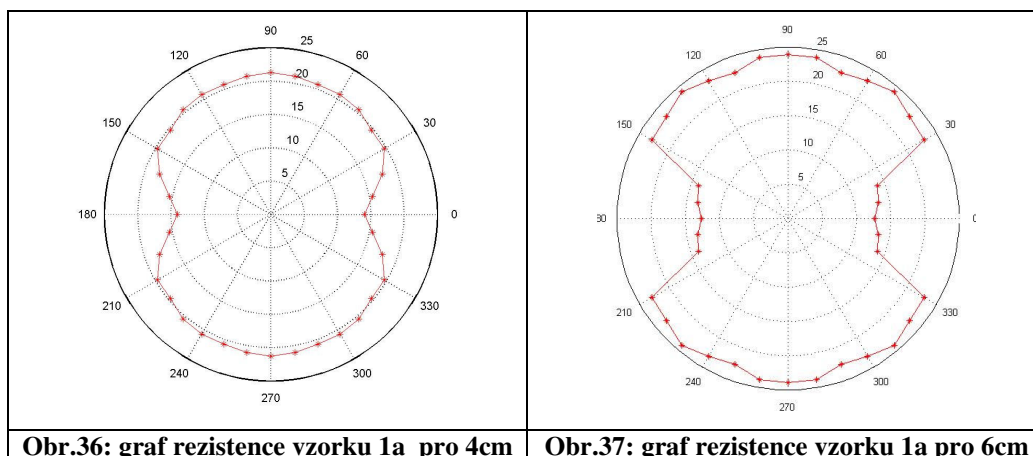
Na obrázcích jsou patrné vyšší hodnoty rezistence v oblasti útku, to je způsobené větším množstvím fibril, které mají za následek zaizolování vodivého vlákna, jak je vidět na obrázku 18b.



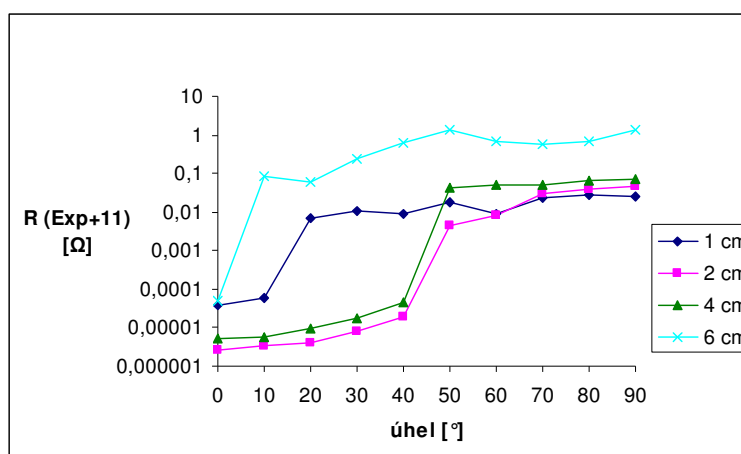
Obr.34: graf rezistence vzorku 1a pro 1cm



Obr.35: graf rezistence vzorku 1a pro 2cm



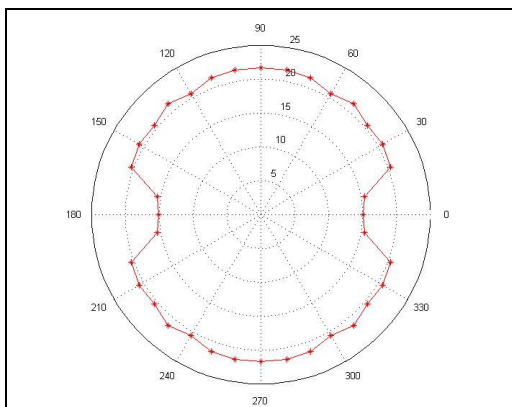
U vzorku 1b se projevuje nejen zastoupení uhlíku v osnovním směru, ale i vliv jeho struktury, kde do keprové vazby byla zatkána antistatika s roztečí 10 x 5 mm. Právě pro tyto vzorky je výhodné provést měření anizotropie vlastností.



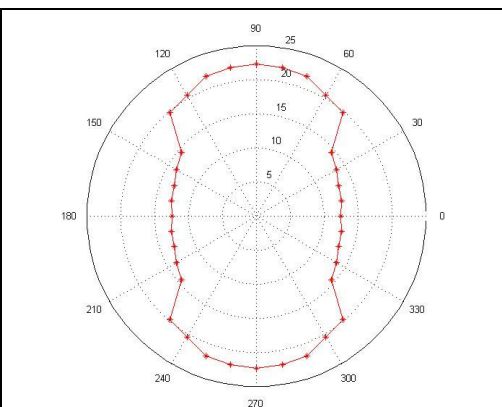
Tabulka VII: naměřené hodnoty pro vzorek 1b

		vzdálenost elektrod (cm)			
Exp = 10 ¹¹		1cm	2cm	4cm	6cm
1b	0	0,000037334	2,5633E-06	0,000005217	4,95E-05
	10	0,00005798	3,4607E-06	5,4216E-06	0,082425
	20	0,0070023	4,1684E-06	9,1872E-06	0,059518
	30	0,010461	8,0866E-06	0,000018131	0,23141
	40	0,0087147	0,000019756	0,000045603	0,60432
	50	0,018394	0,0043285	0,041704	1,3263
	60	0,009063	0,0080252	0,05053	0,68542
	70	0,022567	0,029615	0,051807	0,58446
	80	0,027588	0,038896	0,064448	0,6619
	90	0,025431	0,047823	0,071555	1,3303

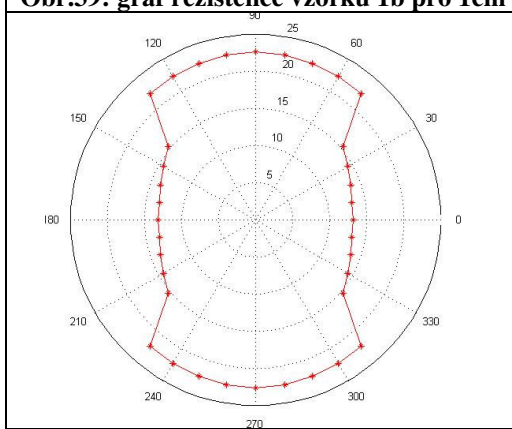
Anizotropie rezistivity je nejvíce viditelná na grafech se vzdálenostmi elektrod $l_2 = 2\text{ cm}$ a $l_3 = 4\text{ cm}$ (obr. 40 a 41).



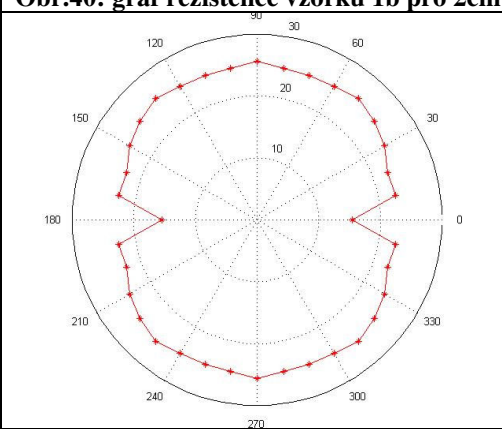
Obr.39: graf rezistence vzorku 1b pro 1cm



Obr.40: graf rezistence vzorku 1b pro 2cm

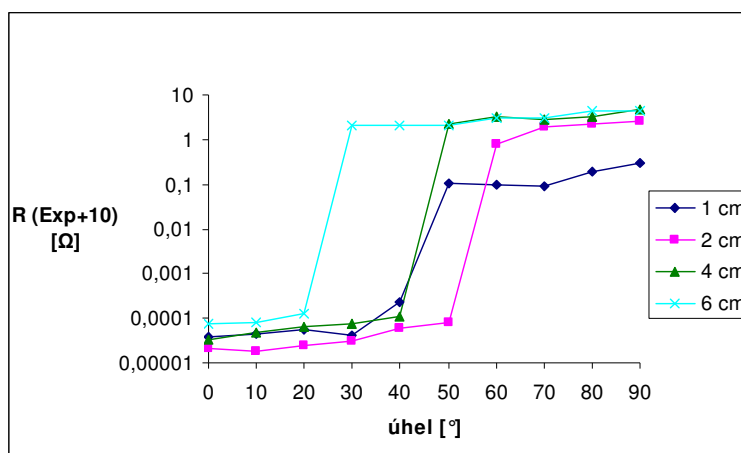


Obr.41: graf rezistence vzorku 1b pro 4cm



Obr.42: graf rezistence vzorku 1b pro 6cm

Z obrázku 43 pro vzorek 1c můžeme pozorovat srovnatelný průběh křivek ve všech čtyřech měřeních. V oblasti mezi úhly 20° a 50° dochází k výraznému zvýšení hodnot spojené se zastoupením uhlíku ve směru osnovy, ale velký vliv má i krepová vazba.

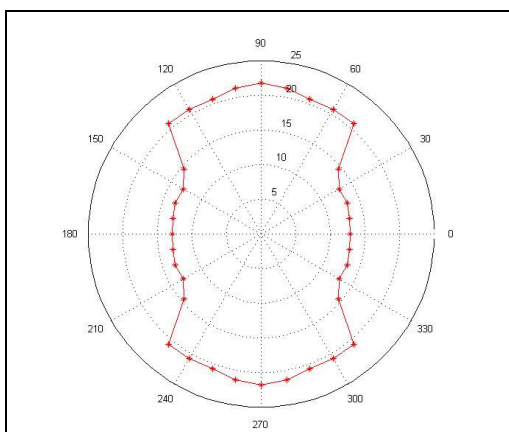


Obr.43: vzorek 1c

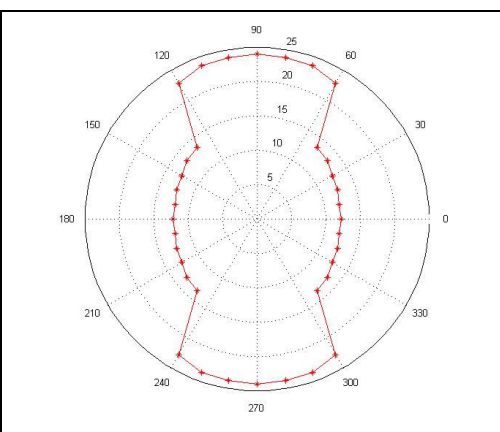
Tabulka VIII: naměřené hodnoty pro vzorek 1c

		vzdálenost elektrod (cm)			
Exp = 10 ¹⁰		1cm	2cm	4cm	6cm
1c	0	0,000038814	0,000020987	0,000032342	7,77E-05
úhly (°)	10	0,000043526	0,000018604	0,000048153	8,3E-05
	20	0,000054369	0,00002399	0,000064968	0,000124
	30	0,000042297	0,000030838	0,000074451	2,086
	40	0,00022341	0,000059526	0,000112	2,1019
	50	0,10574	0,000082289	2,3179	2,0522
	60	0,10096	0,78223	3,2997	3,1033
	70	0,092283	1,9783	2,7475	3,1214
	80	0,1905	2,2823	3,3706	4,2683
	90	0,29917	2,6518	4,6589	4,412

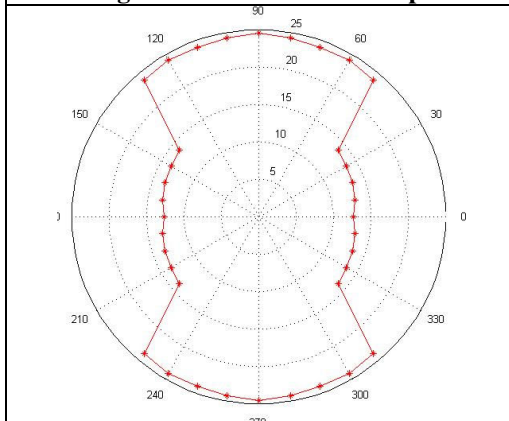
Zřetelně viditelná anizotropie rezistivity u vzorku 1c.



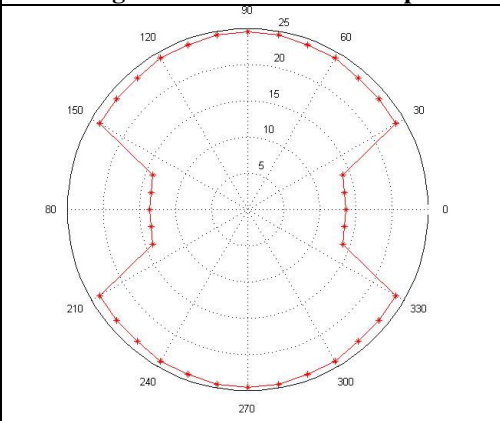
Obr.44: graf rezistence vzorku 1c pro 1cm



Obr.45: graf rezistence vzorku 1c pro 2cm

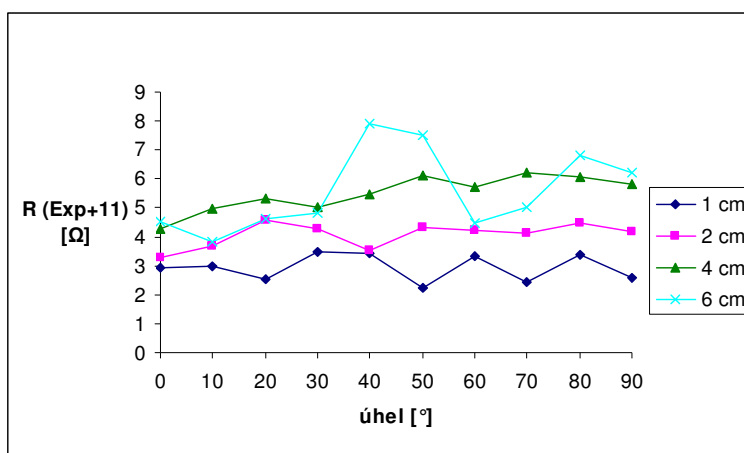


Obr.46: graf rezistence vzorku 1c pro 4cm



Obr.47: graf rezistence vzorku 1c pro 6cm

Vzorek 1d má v sobě zatkána vodivá vlákna pouze ve směru útku, ta jsou však zaizolována fibrilami, proto jsou naměřené hodnoty a průběh křivek srovnatelné a elektrické vlastnosti izotropní (obr.48).

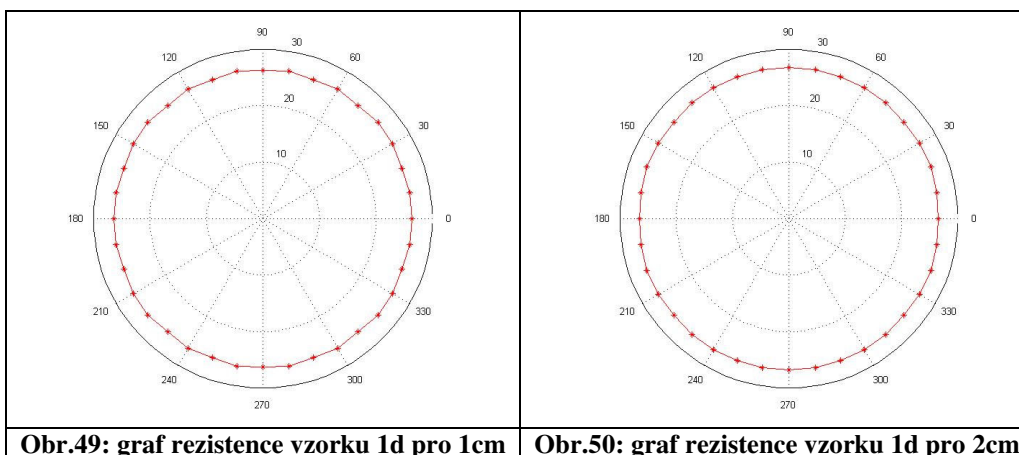


Obr.48: vzorek 1d

Tabulka IX: naměřené hodnoty pro vzorek 1d

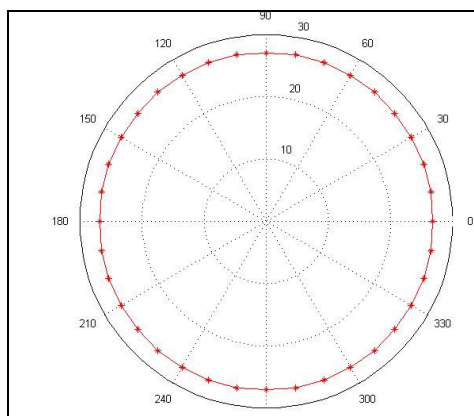
		vzdálenost elektrod (cm)			
Exp = 10 ¹¹		1cm	2cm	4cm	6cm
1d	0	2,9509	3,2842	4,2639	4,5426
úhly (°)	10	3,0046	3,7043	4,9721	3,8209
	20	2,5297	4,5726	5,3415	4,6481
	30	3,4898	4,2546	5,0323	4,8288
	40	3,4399	3,5144	5,4787	7,9078
	50	2,2618	4,3115	6,1362	7,5084
	60	3,3446	4,2397	5,7079	4,4589
	70	2,4136	4,1265	6,2146	5,019
	80	3,3941	4,4792	6,0805	6,8358
	90	2,6035	4,1797	5,8134	6,2037

Grafy 49 až 52 nám dokazují izotropní elektrické vlastnosti vzorku.

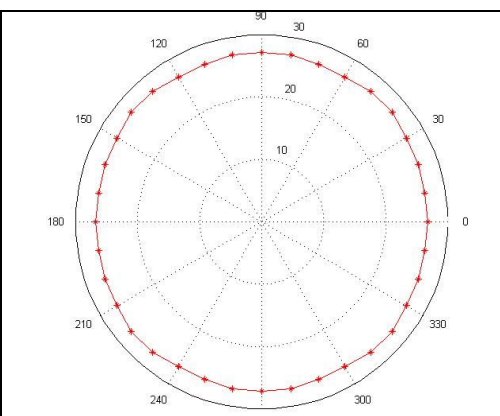


Obr.49: graf rezistence vzorku 1d pro 1cm

Obr.50: graf rezistence vzorku 1d pro 2cm

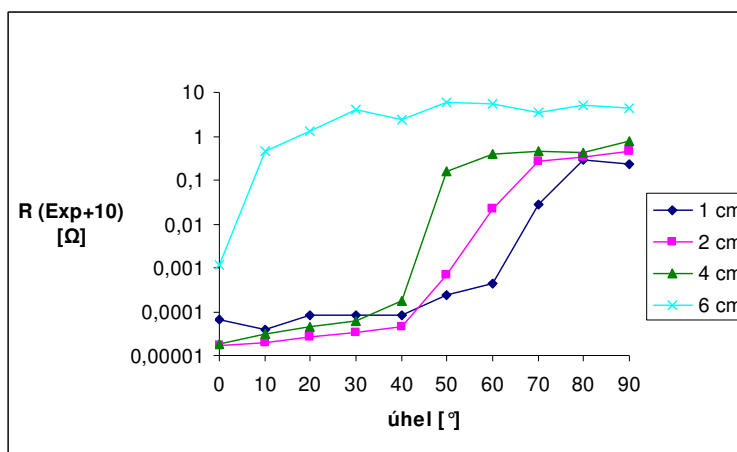


Obr.51: graf rezistence vzorku 1d pro 4cm



Obr.52: graf rezistence vzorku 1d pro 6cm

U vzorku 2a můžeme opět sledovat průběh křivek vykreslující anizotropní vlastnosti vzorku, ta je způsobena poměrem vodivých vláken ve směru útku a osnovy.

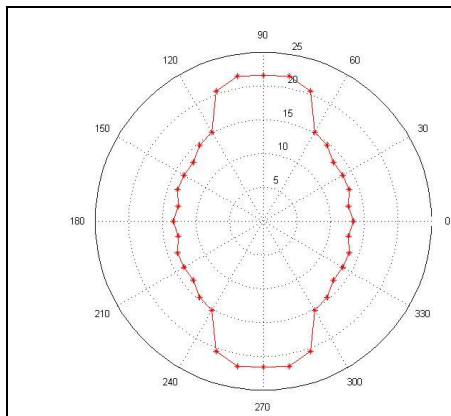


Obr.53: vzorek 2a

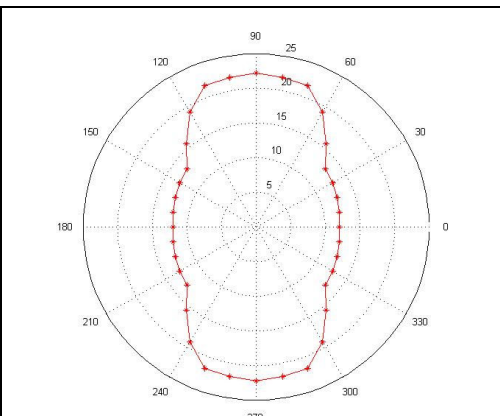
Tabulka X: naměřené hodnoty pro vzorek 2a

		vzdálenost elektrod (cm)			
Exp = 10 ¹⁰		1cm	2cm	4cm	6cm
2a	0	0,00006612	0,000016677	0,000018776	0,001139
	10	0,000038256	0,000019142	0,000032008	0,44413
	20	0,000081034	0,000026288	0,000044993	1,3227
	30	0,000082144	0,000032903	0,000061904	4,116
	40	0,000082194	0,000045517	0,00017929	2,3903
	50	0,00024189	0,00067099	0,1584	5,9484
	60	0,00042733	0,02193	0,39305	5,6459
	70	0,027936	0,27101	0,46003	3,4399
	80	0,27936	0,32791	0,43518	5,1043
	90	0,22386	0,43674	0,75396	4,2701

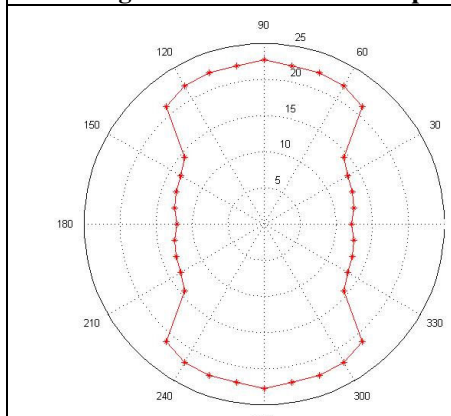
Můžeme pozorovat větší hodnoty elektrické rezistence kolem oblasti 90° , tedy ve směru útku, způsobené větším množstvím fibril ve struktuře příze útku., vedoucí k zaizolování uhlíkových vláken, respektive k nižší vodivosti. Právě pro tyto typy vzorků je důležité měřit anizotropii rezistivity.



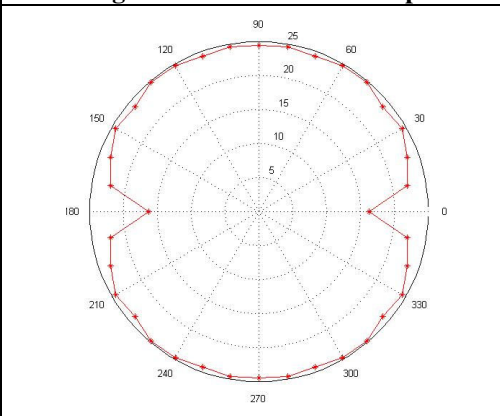
Obr.54: graf rezistence vzorku 2a pro 1cm



Obr.55: graf rezistence vzorku 2a pro 2cm

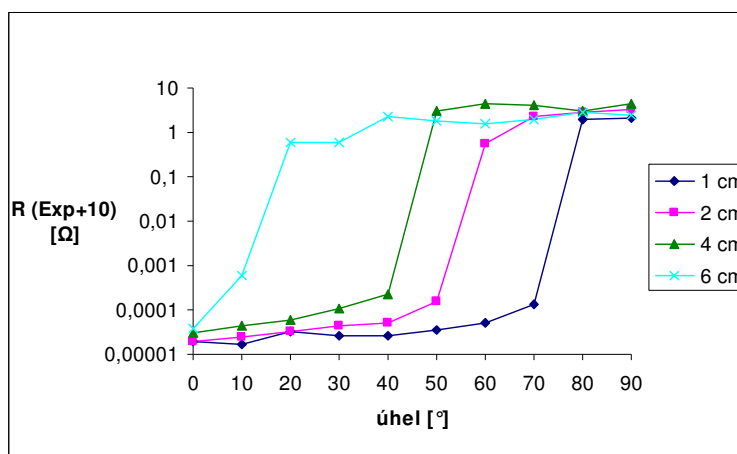


Obr.56: graf rezistence vzorku 2a pro 4cm



Obr.57: graf rezistence vzorku 2a pro 6cm

U vzorku 2b má vliv na jeho rozdílnost elektrických vlastností jeho keprová vazba a struktura příze v útku, jelikož rozteč uhlíkových vláken je stejná jak pro útek, tak pro osnovu.

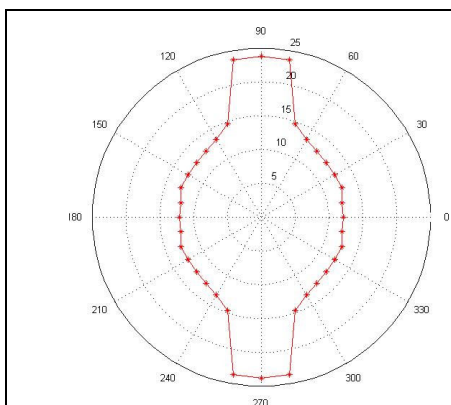


Obr.58: vzorek 2b

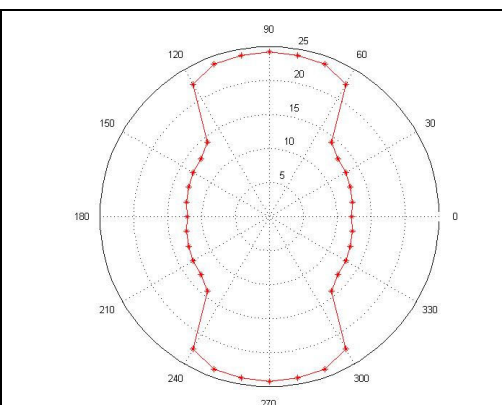
Tabulka XI: naměřené hodnoty pro vzorek 2b

		vzdálenost elektrod (cm)			
Exp = 10 ¹⁰		1cm	2cm	4cm	6cm
2b	0	0,000018957	0,000018945	0,000031121	3,94E-05
úhly (°)	10	0,000017222	0,00002357	0,000045216	0,000609
	20	0,00003245	0,000032098	0,000059699	0,61244
	30	0,000026182	0,000044552	0,0001045	0,5729
	40	0,000027038	0,000052389	0,00022158	2,1817
	50	0,000035449	0,00015698	3,0371	1,8024
	60	0,000049539	0,57052	4,4639	1,5929
	70	0,00012991	2,2567	4,2327	1,947
	80	1,909	2,8598	3,0607	2,8616
	90	2,1194	3,3367	4,4648	2,4406

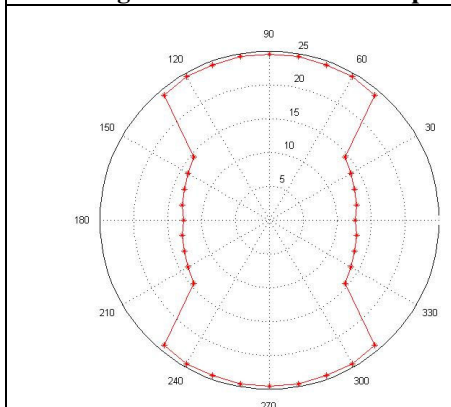
Na všech čtyřech obrázcích jsou vidět průběhy křivek typické pro anizotropní elektrické vlastnosti textilie.



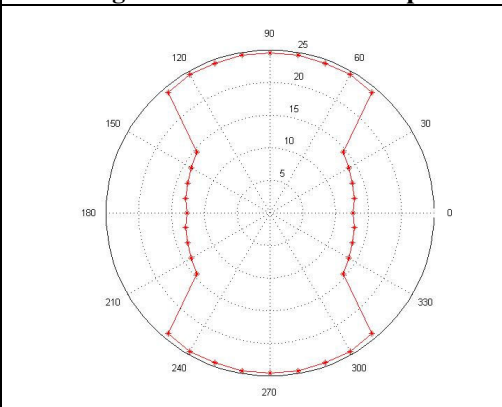
Obr.59: graf rezistence vzorku 2b pro 1cm



Obr.60: graf rezistence vzorku 2b pro 2cm

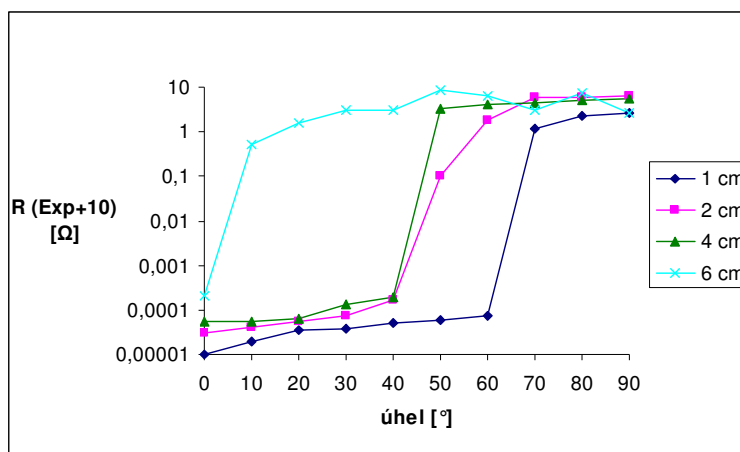


Obr.61: graf rezistence vzorku 2b pro 4cm



Obr.62: graf rezistence vzorku 2b pro 6cm

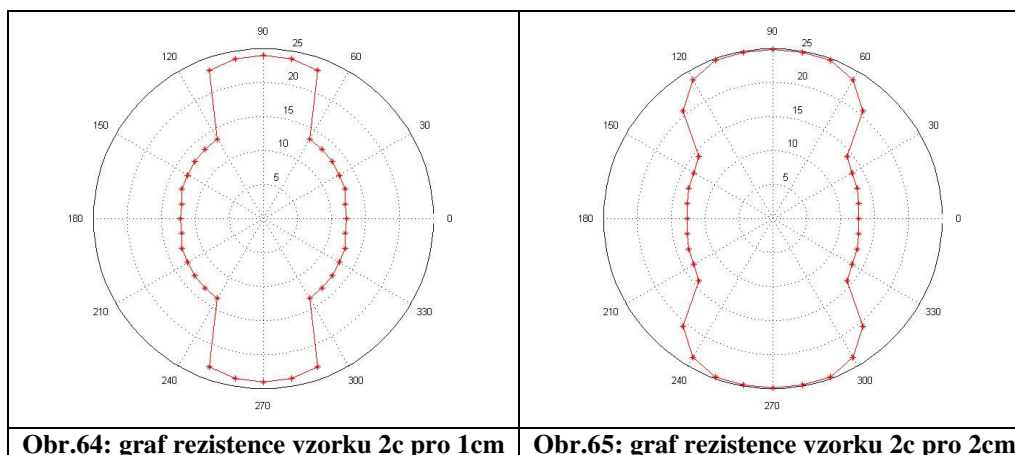
Anizotropie je zde způsobena nižším zastoupením antistatik v útku, které je ještě podmíněno zaizolováním uhlíkového vlákna fibrilami.



Obr.63: vzorek 2c

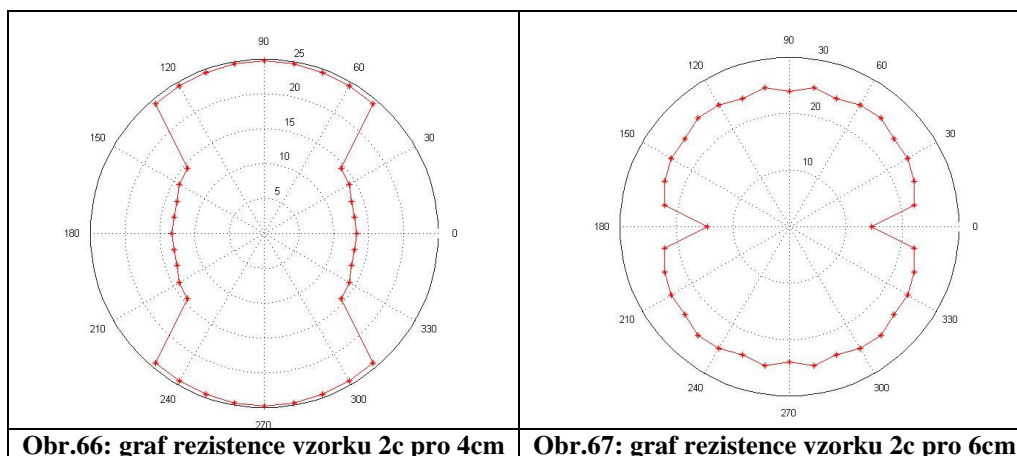
Tabulka XII: naměřené hodnoty pro vzorek 2c

		vzdálenost elektrod (cm)			
Exp = 10 ¹⁰		1cm	2cm	4cm	6cm
2c	0	0,000010025	0,000029825	0,000056076	0,000204
	10	0,000019152	0,000039605	0,000053408	0,51085
	20	0,00003491	0,000053331	0,000064164	1,6145
	30	0,000037453	0,000071323	0,0001362	2,9882
	40	0,000051047	0,00016169	0,00019827	3,1148
	50	0,000061099	0,10181	3,4031	8,8791
	60	0,000075484	1,7813	4,0298	6,5232
	70	1,1661	5,7852	4,3554	3,0826
	80	2,2816	6,093	5,3159	7,2598
	90	2,5908	6,3028	5,6216	2,6038

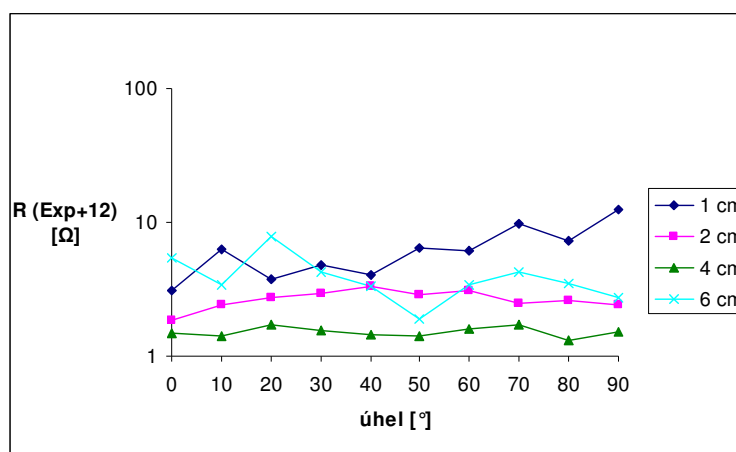


Obr.64: graf rezistence vzorku 2c pro 1cm

Obr.65: graf rezistence vzorku 2c pro 2cm



U vzorku 2d je vodivé vlákno zatkáno pouze ve směru útku, to je však izolováno jemnějšími fibrilami, což vede k izotropním vlastnostem.

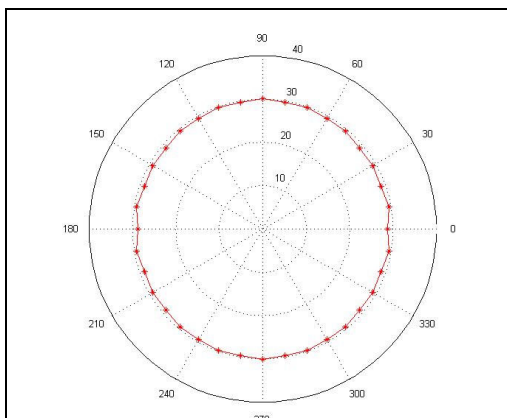


Obr.68: vzorek 2d

Tabulka XIII: naměřené hodnoty pro vzorek 2d

		vzdálenost elektrod (cm)			
Exp = 10 ¹²		1cm	2cm	4cm	6cm
2d	0	3,0899	1,8526	1,4743	5,4684
	10	6,2702	2,3999	1,419	3,4057
	20	3,7647	2,6971	1,694	7,8945
	30	4,8304	2,9044	1,5456	4,2516
	40	3,9939	3,291	1,4514	3,3017
	50	6,4809	2,873	1,4099	1,9137
	60	6,195	3,0624	1,609	3,3883
	70	9,7967	2,4745	1,7058	4,2661
	80	7,2981	2,5763	1,3141	3,4535
	90	12,337	2,4197	1,5156	2,7071

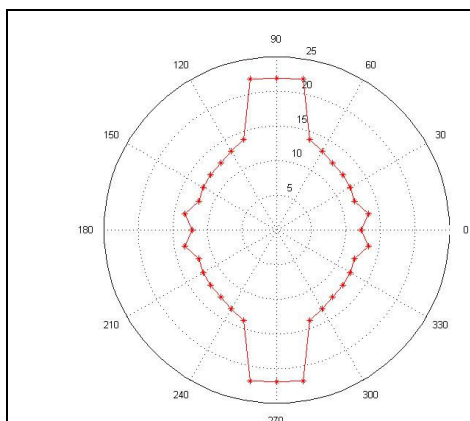
Program Matlab vygeneroval grafy (obr.69 – 72) všech vzdáleností, které dokazují izotropní vlastnosti vzorku 2d.



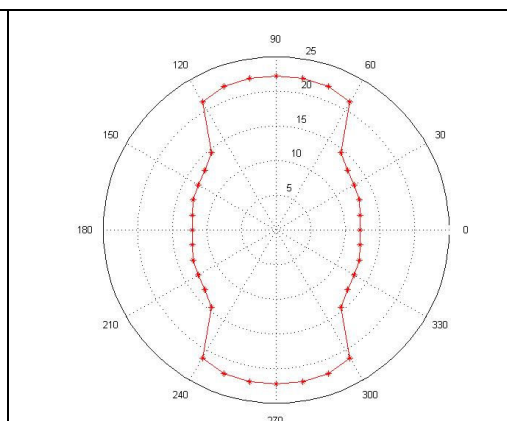
Tabulka XIV: naměřené hodnoty pro vzorek 3a

		vzdálenost elektrod (cm)			
Exp = 10 ¹⁰		1cm	2cm	4cm	6cm
3a	0	0,00002073	0,000018242	0,000020088	3,18E-05
úhly (°)	10	0,000073373	0,000023007	0,000031439	0,000453
	20	0,000015799	0,000033987	0,000051855	0,53373
	30	0,00002238	0,000047167	0,000080136	0,33905
	40	0,000025237	0,000069043	0,00026679	1,5352
	50	0,000030877	0,00021862	0,022028	1,3433
	60	0,000047614	0,18772	0,44007	2,0285
	70	0,00011613	0,37086	0,4266	1,451
	80	0,39135	0,43332	0,55983	1,9236
	90	0,30975	0,44916	0,53473	1,8647

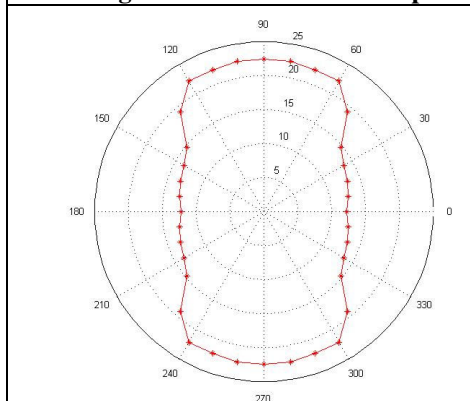
Obrázky 74 – 77 vykreslují anizotropní vlastnosti vzorku 3a. Pozorujeme nižší hodnoty rezistence v oblasti osnovy (0° a 180°) a naopak vyšší při úhlech 90° a 270°.



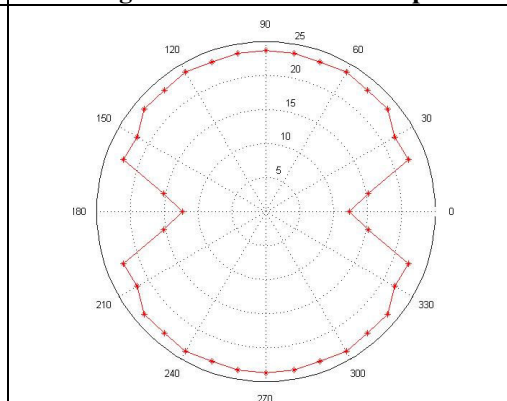
Obr.74: graf rezistence vzorku 3a pro 1cm



Obr.75: graf rezistence vzorku 3a pro 2cm

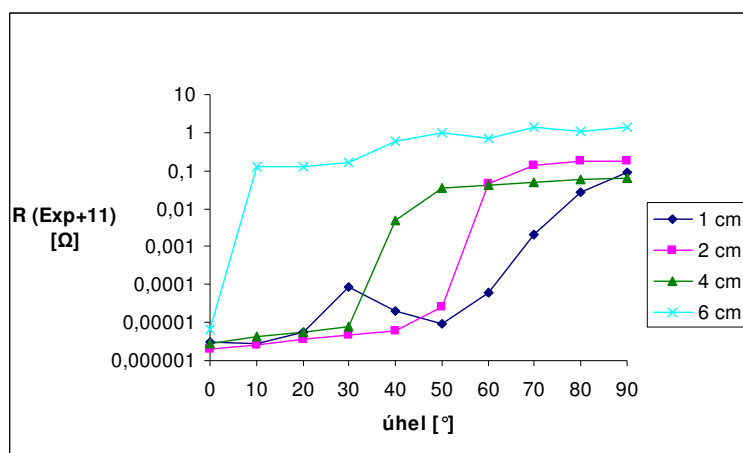


Obr.76: graf rezistence vzorku 3a pro 4cm



Obr.77: graf rezistence vzorku 3a pro 6cm

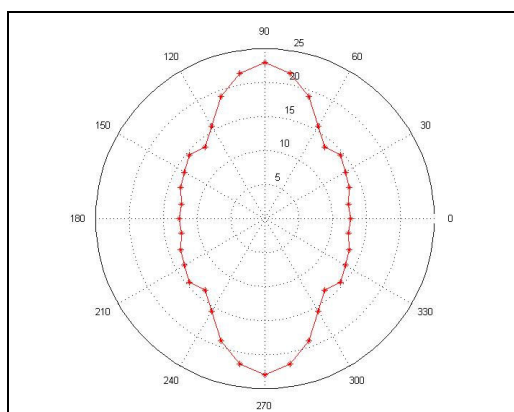
U vzorku 3b sledujeme průběhy křivek demonstrující anizotropní vlastnosti materiálu. Na obrázku 78 je vidět srovnatelná trajektorie spojnice trendu, zejména pro měření vzdáleností elektrod $l_2 = 2\text{ cm}$ a $l_3 = 4\text{ cm}$.



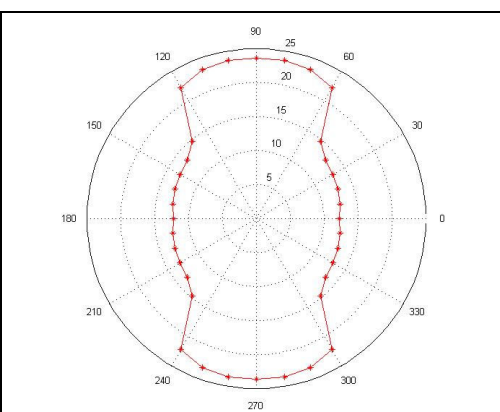
Obr.78: vzorek 3b

Tabulka XV: naměřené hodnoty pro vzorek 3b

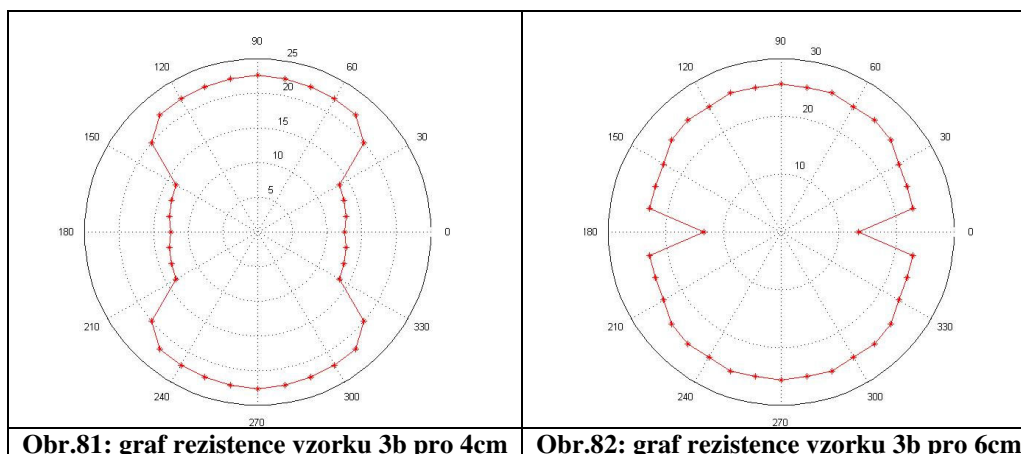
Vzdálenost elektrod (cm)					
Exp = 10^{11}		1cm	2cm	4cm	6cm
3b	0	2,9663E-06	2,0384E-06	2,8009E-06	6,84E-06
úhly (°)	10	2,6968E-06	2,6031E-06	4,3507E-06	0,12329
	20	5,6686E-06	3,6172E-06	5,6319E-06	0,1263
	30	0,000088763	4,6027E-06	7,9821E-06	0,16759
	40	0,000020569	6,1556E-06	0,004995	0,56937
	50	9,6132E-06	0,00002625	0,036078	0,94678
	60	0,00006288	0,045243	0,042713	0,72882
	70	0,0019754	0,13369	0,047827	1,4084
	80	0,027044	0,17704	0,056998	1,0714
	90	0,09185	0,17815	0,06462	1,4491



Obr.79: graf rezistence vzorku 3b pro 1cm



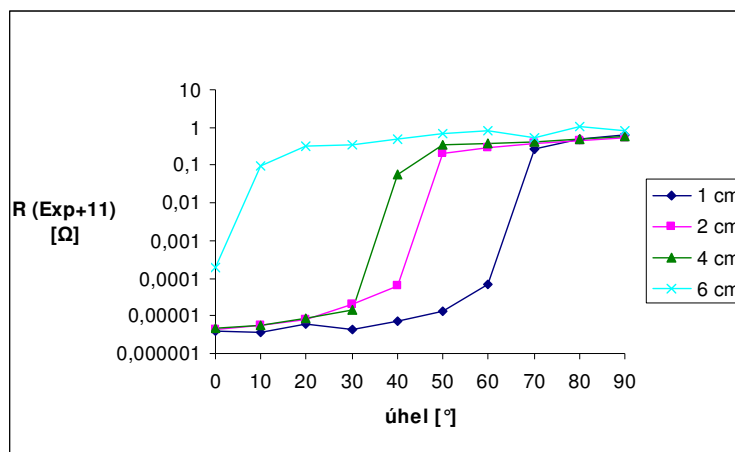
Obr.80: graf rezistence vzorku 3b pro 2cm



Obr.81: graf rezistence vzorku 3b pro 4cm

Obr.82: graf rezistence vzorku 3b pro 6cm

Obrázek 83 vykresluje průběhy křivek, které mají srovnatelný trend. Vzorek 3c má stejnou rozteč vodivého vlákna jak v útku, tak i v osnově. Anizotropní vlastnosti způsobuje větší počet fibril ve směru útku, které způsobí zaizolování antistatika.

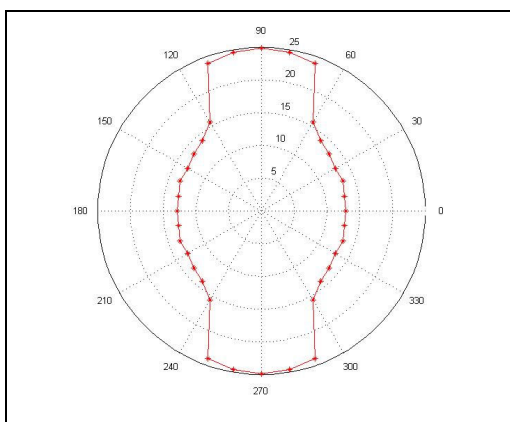


Obr.83: vzorek 3c

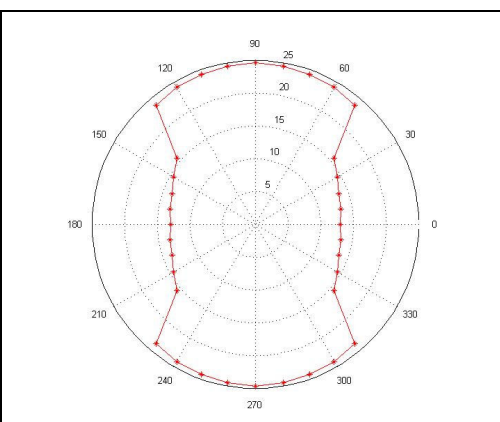
Tabulka XVI: naměřené hodnoty pro vzorek 3c

		vzdálenost elektrod (cm)			
Exp = 10 ¹¹		1cm	2cm	4cm	6cm
3c	0	4,0201E-06	4,4547E-06	4,8112E-06	0,000185
úhly (°)	10	3,6713E-06	5,6098E-06	5,6459E-06	0,091476
	20	5,8613E-06	7,6989E-06	8,7075E-06	0,31898
	30	4,4554E-06	0,000020641	0,00001471	0,35858
	40	7,4113E-06	0,000064601	0,055118	0,48422
	50	0,000012913	0,19992	0,34268	0,71169
	60	0,00006648	0,29752	0,36696	0,85499
	70	0,2647	0,36907	0,42279	0,51363
	80	0,47295	0,45831	0,48263	1,0295
	90	0,65211	0,5291	0,56036	0,78701

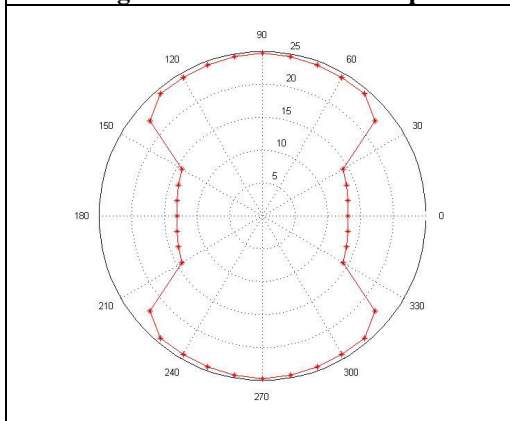
Anizotropie se nejvíce projevila v měření pro vzdálenost elektrod $l_3 = 4\text{cm}$ (obr.86). Naopak nejméně viditelná je na obrázku 87, což může být zapříčiněno vzdáleností elektrod, které mohou vést k nižší citlivosti měření.



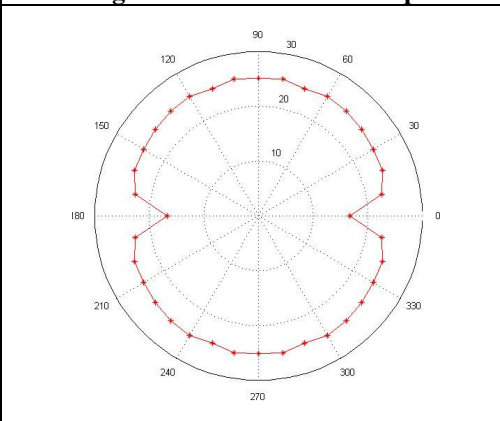
Obr.84: graf rezistence vzorku 3c pro 1cm



Obr.85: graf rezistence vzorku 3c pro 2cm

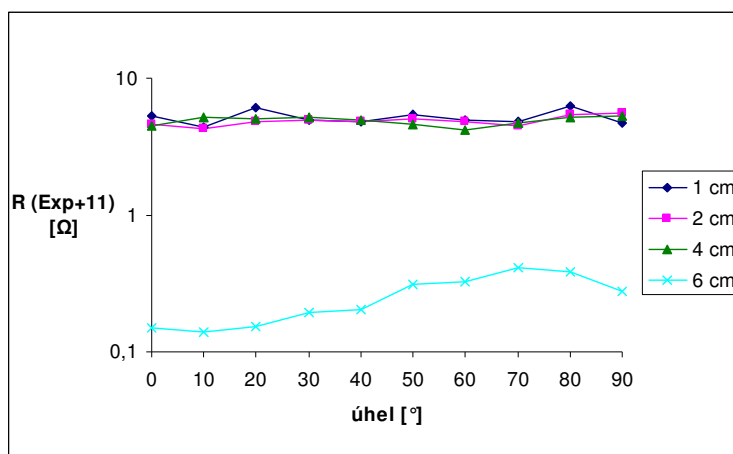


Obr.86: graf rezistence vzorku 3c pro 4cm



Obr.87: graf rezistence vzorku 3c pro 6cm

U vzorku 3d byli prokázány izotropní vlastnosti, to způsobila struktura vazby vzorku, která má ve směru útku více fibril, které jsou jemnější a ty zaizolují uhlíkové vlákno. Ve směru osnovy tento vzorek nemá zatkáno žádná antistatika, proto jsou jeho vlastnosti izotropní.

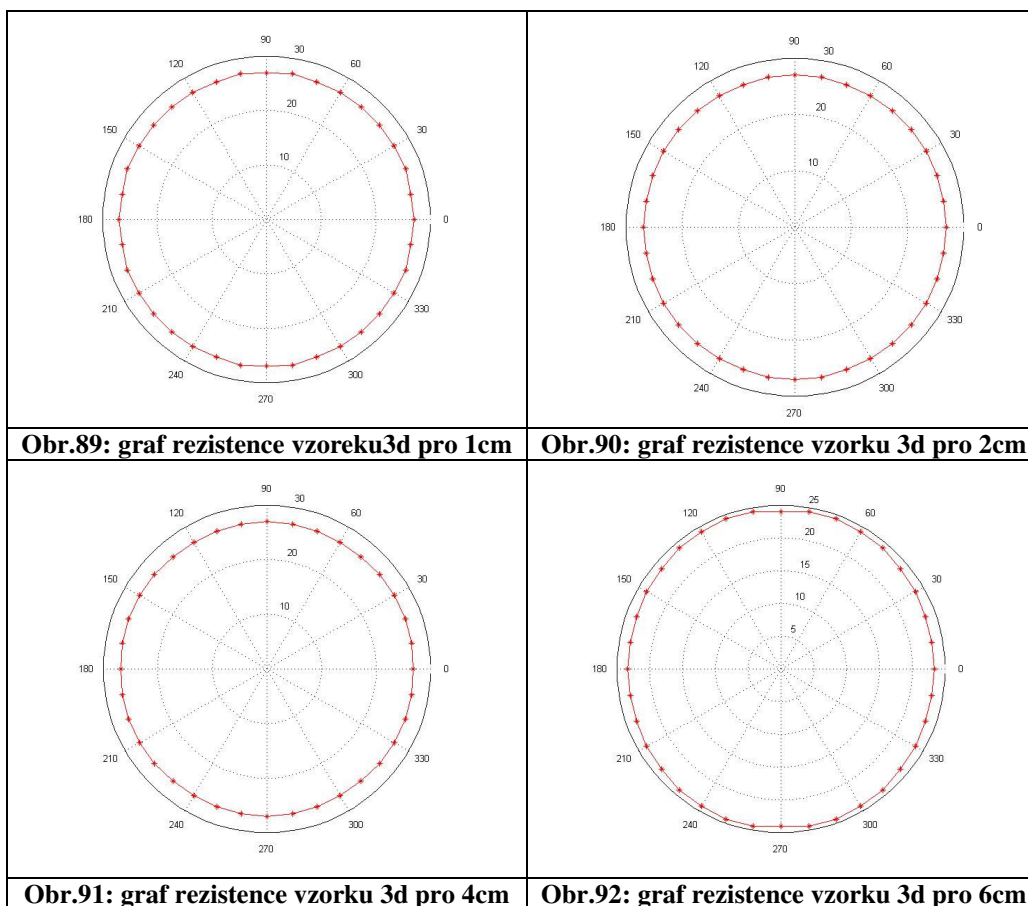


Obr.88: vzorek 3d

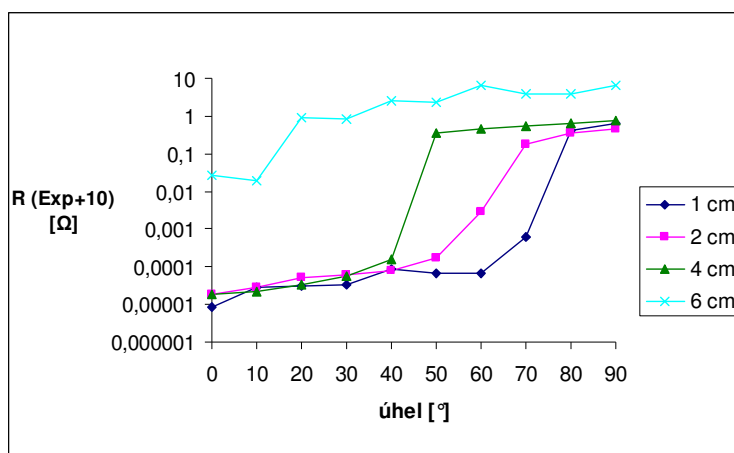
Tabulka XVII: naměřené hodnoty pro vzorek 3d

		vzdálenost elektrod (cm)			
Exp = 10 ¹¹		1cm	2cm	4cm	6cm
3d	0	5,2827	4,6393	4,5223	0,14866
úhly (°)	10	4,3654	4,2643	5,2052	0,13911
	20	6,0735	4,7712	5,0631	0,15181
	30	4,9462	4,9378	5,1695	0,19485
	40	4,8202	4,8653	4,8956	0,20492
	50	5,4224	5,0566	4,5844	0,3127
	60	4,923	4,8567	4,1752	0,32838
	70	4,8546	4,5162	4,7036	0,41396
	80	6,1886	5,4108	5,1759	0,38399
	90	4,7213	5,5975	5,3031	0,27465

Na obrázcích 89 – 92 je vidět průběh křivek dokazující ve všech směrech izotropní vlastnosti vzorku 3d.



Čtvrtá řada vzorků se vyznačuje absencí antistatik ve směru osnovy, proto budeme předpokládat anizotropii rezistivity vzorků a stoupající průběh křivek v důsledku nízkých hodnot vodivosti útku.

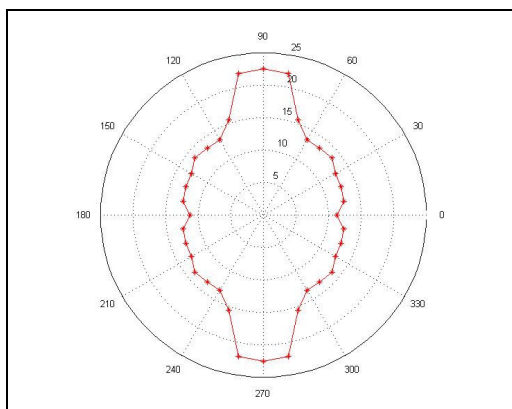


Obr.93: vzorek 4a

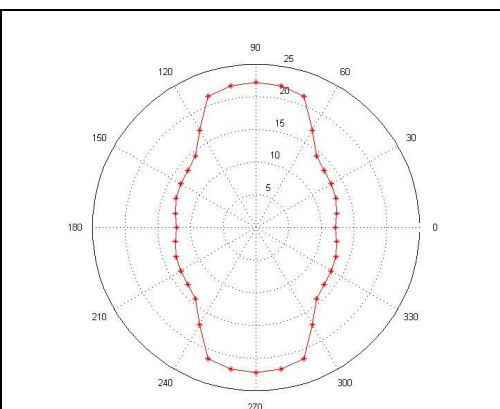
Tabulka XVIII: naměřené hodnoty pro vzorek 4A

vzdálenost elektrod (cm)					
Exp = 10 ¹⁰		1cm	2cm	4cm	6cm
4a	0	8,2345E-06	0,000018644	0,000018519	0,028003
	10	0,000027368	0,000027375	0,00002249	0,01977
	20	0,000032109	0,000049892	0,000034462	0,91401
	30	0,000033853	0,000059257	0,000055995	0,81295
	40	0,000088651	0,000076968	0,00016292	2,4596
	50	0,000067435	0,00016888	0,35277	2,4178
	60	0,0000673	0,0027929	0,45857	6,6766
	70	0,00063059	0,18446	0,54387	3,9701
	80	0,41532	0,34951	0,6482	3,9314
	90	0,64086	0,46608	0,74116	6,482

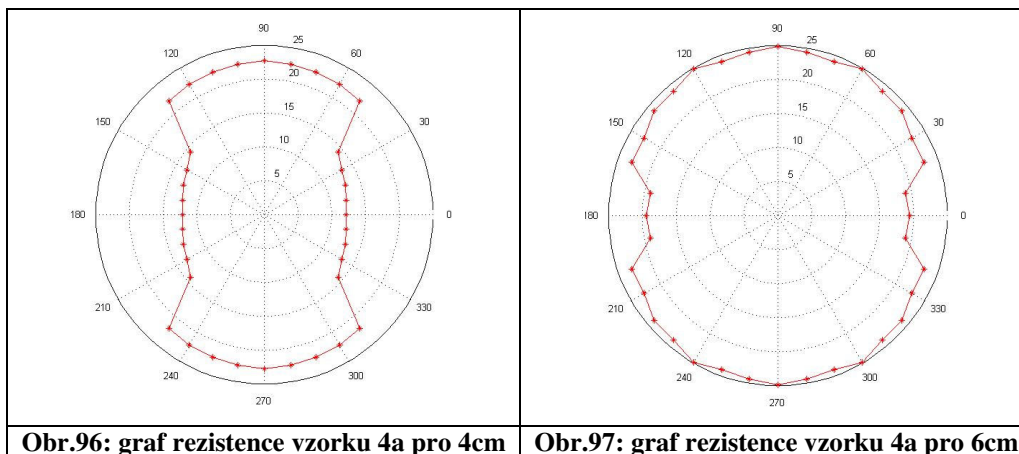
Při malé vzdálenosti elektrod nám k dobrým elektrickým vlastnostem mnohem dříve „přispěje“ antistatikum v osnově (obr. 94).



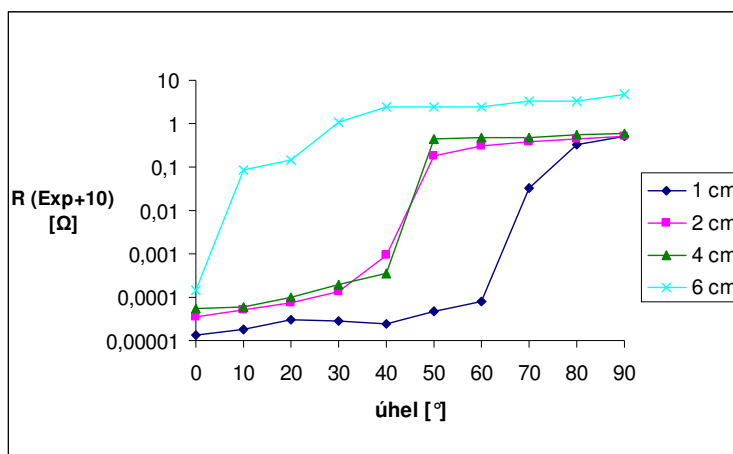
Obr.94: graf rezistence vzorku 4a pro 1cm



Obr.95: graf rezistence vzorku 4a pro 2cm

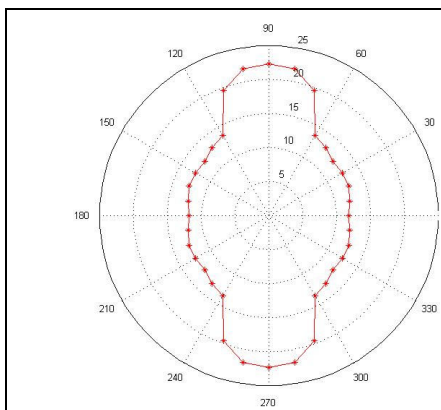


Obrázek 98 popisuje trajektorii křivek všech čtyřech měření pro vzorek 4b. Anizotropie rezistivity se nejvíce projevila u měření pro vzdálenost 2 a 4 cm, kde se průběhy jejich křivek téměř překrývají.

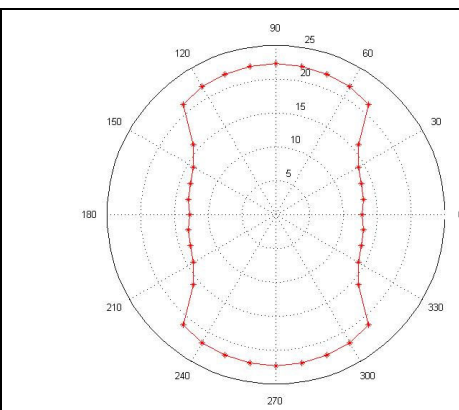


Tabulka XIX: naměřené hodnoty pro vzorek 4b

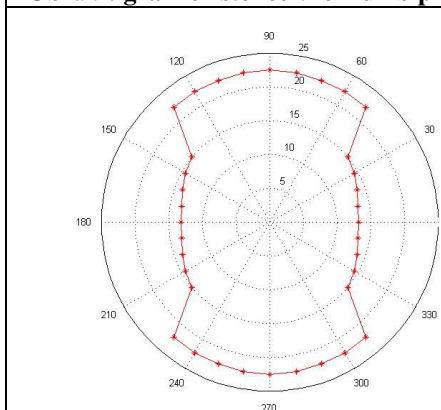
		vzdálenost elektrod (cm)			
Exp = 10 ¹⁰		1cm	2cm	4cm	6cm
4b	0	0,000013724	0,000035216	0,000054243	0,000149
	10	0,000018659	0,000049621	0,000061012	0,088376
	20	0,000029598	0,000071825	0,00010188	0,14893
	30	0,000028248	0,00013348	0,0001967	1,1113
	40	0,000024414	0,00090047	0,00035537	2,5062
	50	0,000047378	0,17742	0,43524	2,361
	60	0,000078335	0,30957	0,49106	2,5055
	70	0,033019	0,38503	0,4928	3,1943
	80	0,31734	0,45252	0,54389	3,3554
	90	0,5113	0,49851	0,58346	4,8092



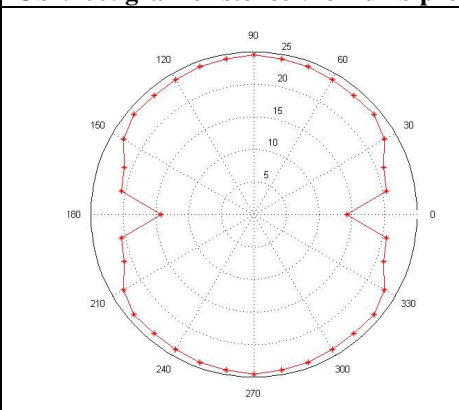
Obr.99: graf rezistence vzorku 4b pro 1cm



Obr.100: graf rezistence vzorku 4b pro 2cm

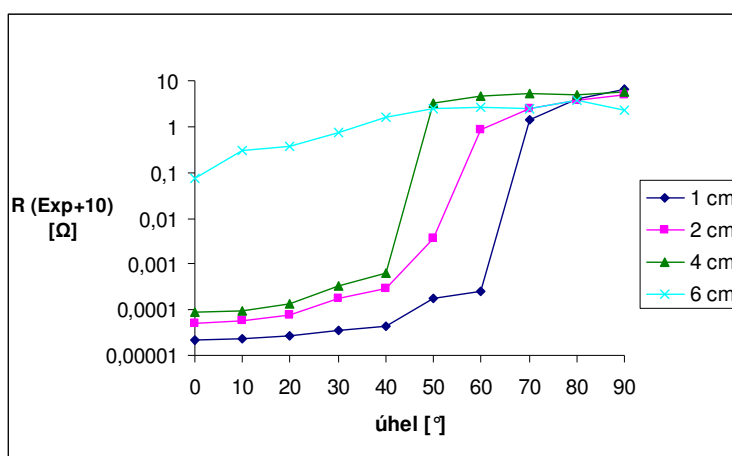


Obr.101: graf rezistence vzorku 4b pro 4cm



Obr.102: graf rezistence vzorku 4b pro 6cm

U vzorku 4c pozorujeme rozdílné elektrické vlastnosti mezi úhly 0° až 90° . Na obrázku 103 vidíme podobný průběh křivek měření se vzdálenostmi $l_1 = 1\text{cm}$, $l_2 = 2\text{cm}$ a $l_3 = 4\text{cm}$. Zatímco u měření $l_4 = 6\text{cm}$ nejsou anizotropní vlastnosti tak jasné. To může být způsobeno vzdáleností elektrod, která v tomto případě může vést k nepřesnému měření.

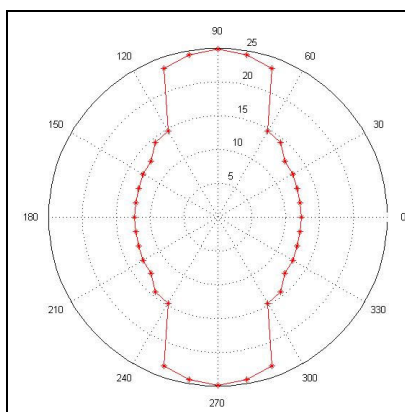


Obr.103: vzorek 4c

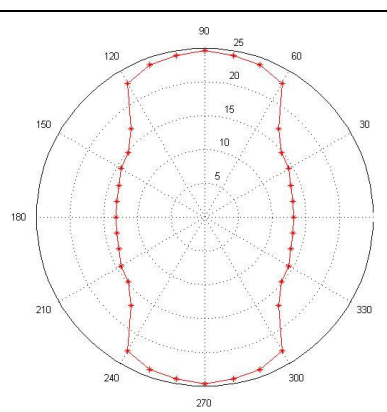
Tabulka XX: naměřené hodnoty pro vzorek 4c

		vzdálenost elektrod (cm)			
Exp = 10 ¹⁰		1cm	2cm	4cm	6cm
4c	0	0,000022053	0,000050219	0,000089833	0,074243
úhly (°)	10	0,000023071	0,000057945	0,000095483	0,29012
	20	0,00002683	0,000075844	0,00013186	0,37496
	30	0,000034501	0,00017412	0,00034093	0,75953
	40	0,000042564	0,0002939	0,00063622	1,5764
	50	0,00018314	0,0036956	3,3291	2,4134
	60	0,00025575	0,85516	4,7218	2,7067
	70	1,4137	2,4881	5,3128	2,4898
	80	3,9506	3,6678	4,8184	3,8483
	90	6,663	4,9029	5,5265	2,2618

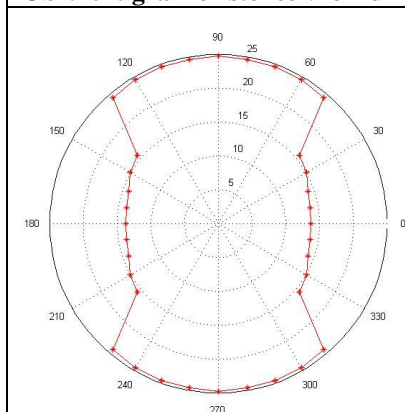
Průběhy křivek pro vzorek 4c popisují anizotropní vlastnosti materiálu. Pouze u měření se vzdáleností $l_4 = 6\text{cm}$, kde není anizotropie jasně viditelná.



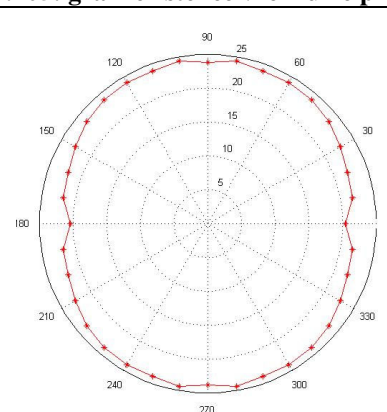
Obr.104: graf rezistence vzorku 4c pro 1cm



Obr.105: graf rezistence vzorku 4c pro 2cm

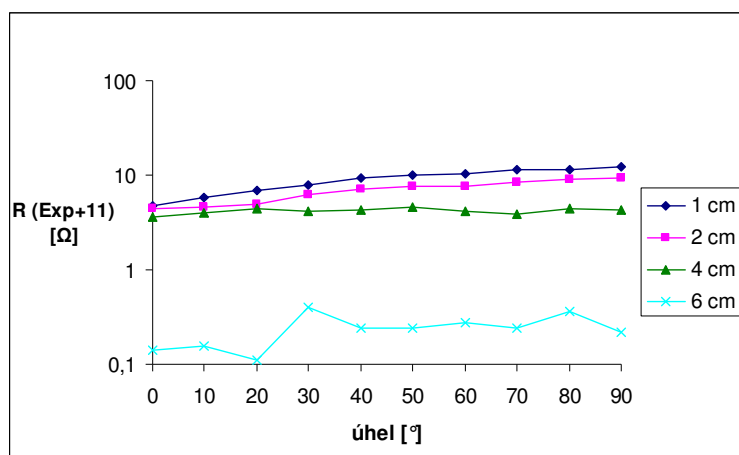


Obr.106: graf rezistence vzorku 4c pro 4cm



Obr.107: graf rezistence vzorku 4c pro 6cm

Nepřítomnost vodivého vlákna zapříčiňuje izotropní vlastnosti vzorku 4d (obr. 108).

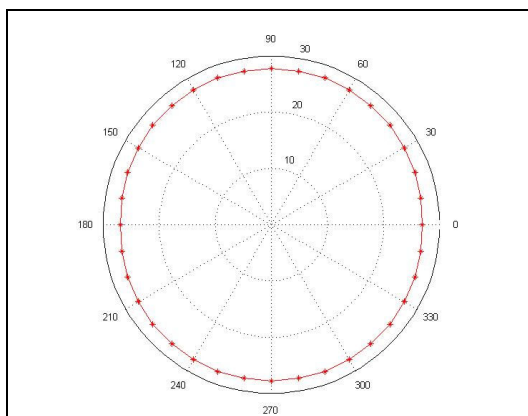


Obr.108: vzorek 4d

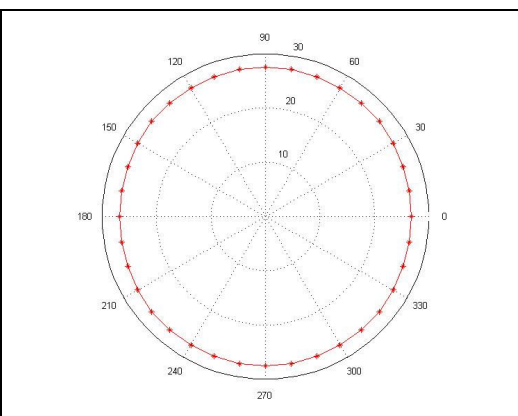
Tabulka XXI: naměřené hodnoty pro vzorek 4d

		Vzdálenost elektrod (cm)			
Exp = 10 ¹¹		1cm	2cm	4cm	6cm
4d	0	4,701	4,4007	3,565	0,13987
úhly (°)	10	5,7341	4,6333	3,9916	0,153
	20	6,7803	4,8939	4,3909	0,11157
	30	7,7576	6,2716	4,1935	0,40692
	40	9,3891	7,1632	4,2638	0,24031
	50	9,9852	7,6661	4,5648	0,23944
	60	10,482	7,7466	4,1403	0,27818
	70	11,636	8,4314	3,8825	0,24449
	80	11,408	9,1168	4,391	0,36556
	90	12,445	9,2249	4,2876	0,21862

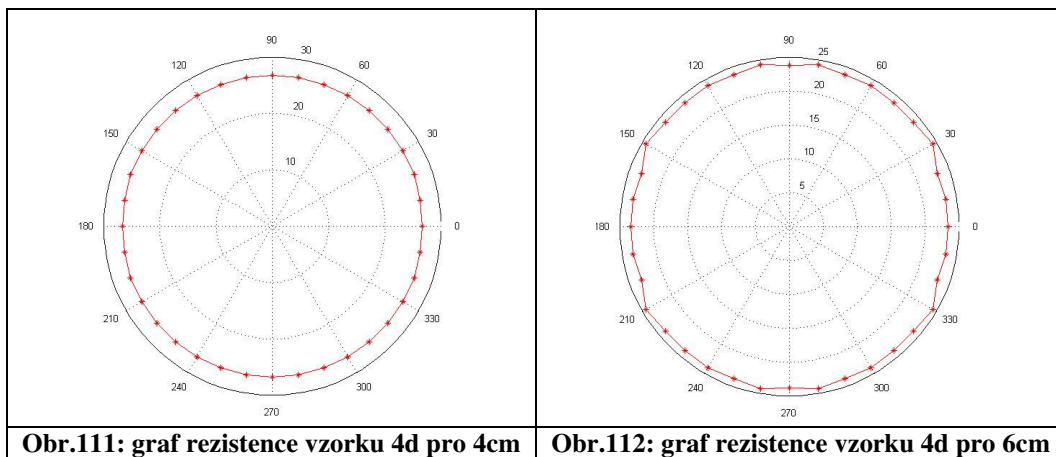
Na obrázcích můžeme sledovat srovnatelné průběhy křivek ve všech čtyřech vzdálenostech elektrod v rozmezí úhlů 0° – 360°, izotropní vlastnosti.



Obr.109: graf rezistence vzorku 4d pro 1cm



Obr.110: graf rezistence vzorku 4d pro 2cm



4. DISKUZE A VÝSLEDKY

V této části je diskutována metodika experimentu, výsledky a funkčnost použitého přípravku a v neposlední řadě praktický význam pro tvorbu tkanin s izotropními elektrickými vlastnostmi.

Anizotropie rezistivity vzorků byla měřena na přístroji Hewlett Packard 4339-B a přípravku pro měření anizotropie rezistivity textilií. Ten se přiložil na měřený materiál a měřil se elektrický odpor mezi měřicími elektrodami. Jejich vzdálenost, tzv. měřící štěrba, byla variabilní v rozsahu 1 až 6 cm s krokem 1 cm. V samotném experimentu byla měření prováděna se vzdálenostmi $l_1 = 1\text{cm}$, $l_2 = 2\text{cm}$, $l_3 = 4\text{cm}$ a $l_4 = 6\text{cm}$. Následně se z naměřených hodnot určila elektrická rezistence povrchu měřeného materiálu. Ve všech vzdálenostech byly měřeny hodnoty v oblasti úhlů 0° , 10° až 90° . Toto rozmezí úhlů bylo dostačující k získání elektrických vlastností vzorků. Pro lepší reprezentativnost naměřených hodnot byly stabilizovány parametry laboratoře. Relativní vlhkost ovzduší a teplota se pohybovaly v rozmezí $\varphi=30\text{-}35\%$ resp. $t=22\text{-}24^\circ\text{C}$.

Výsledky

V průběhu experimentu se nejvíce projevovала anizotropie rezistivity pro měření se vzdáleností elektrod $l_3 = 4\text{cm}$. Při této vzdálenosti byly jasně viditelné rozdíly ve všech směrech měření. Výsledky potvrdily, že můžeme očekávat izotropní vlastnosti, pokud ve tkanině není zatkáno vodivé vlákno (vzorek 4d). Ty samé vlastnosti se projeví na vzorcích Spolsin a Vektron. Zde byla izotropie zajištěna obsažením antistatik ve směsi materiálu, v případě Spolsinu a vazbou tkaniny u Vektronu, kde se jedná o vzorek s plátňovou vazbou a roztečí antistatických vláken $5 \times 5 \text{ mm}$. Vzorek Spolsin tvořen keprovou vazbou K 2/1, obsahoval vodivé vlákno přímo ve směsi materiálu, tedy bylo rovnoměrně rozmístěné v tkanině. Vzorky 1d, 2d a 3d obsahovaly antistatika pouze v útku, kde docházelo k zaizolování vodivého vlákna způsobené jemnějšími fibrilami a jejich větším počtem, a to vedlo k izotropním vlastnostem.

Izotropní vlastnosti ovlivňuje:

- množství antistatika v jednotlivých směrech
- vazba tkaniny
- struktura příze (může dojít k zaizolování antistatika v přízi)

Před samotným měřením byly vzorky rozděleny do skupin podle roztečí vodivých vláken v útku a v osnově (tab.1). Jednotlivé skupiny a, b, c, d měly konstantní rozteč uhlíkového vlákna ve směru osnovy a variabilní ve směru útku. Hodnoty, respektive grafy, popisující anizotropní a izotropní elektrické vlastnosti vzorků v jednotlivých skupinách, se vyznačovaly srovnatelným průběhem, který popisoval závislost měření na přítomnosti antistatik v látce, vazbě tkaniny a na struktuře vláken.

Skupina a)

U této skupiny vzorků bylo vodivé vlákno zatkáno s roztečí 5 mm ve směru osnovy a s variabilní roztečí ve směru útku. Vliv na anizotropní elektrické vlastnosti měla jak vazba tkaniny, tak i struktura příze. V oblasti útku docházelo k zaizolování antistatik zapříčiněné větším počtem fibril. To vedlo k vyšší vodivosti ve směru osnovy, tedy k nižším hodnotám rezistence v oblasti kolem úhlu 0° a naopak vyšším ve směru útku (90°).

Skupina b)

Antistatika v osnově byla zatkána s roztečí 10 mm. Nižší hodnoty rezistence byly naměřeny ve směru osnovy, tedy se projevovala vyšší vodivost spojená s nižším počtem fibril. Ve směru útku byla rezistivita mnohem vyšší, proto celá skupina b měla anizotropické elektrické vlastnosti. Hodnoty přechodu z nízké rezistence k vyšší se často pohybovaly mezi úhly 40° a 50° , zejména u měření se vzdálenostmi elektrod l_2 a l_3 . To mohlo být způsobeno keprovou vazbou 2/1 jejíž sklon řádků je 45° .

Skupina c)

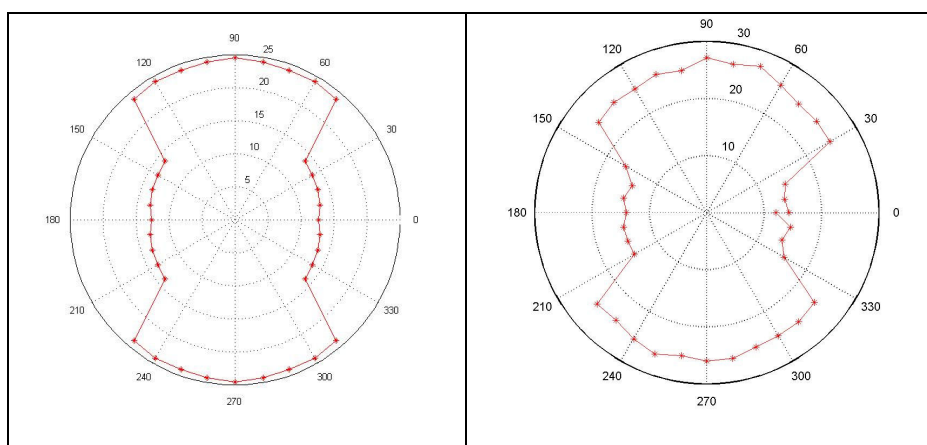
Uhlíková vlákna ve směru osnovy byla zatkána s roztečí 13 mm. U skupiny c byly naměřeny hodnoty pro textile s anizotropními elektrickými vlastnostmi. Vysoké hodnoty rezistence se projevovaly v oblasti útku, proto opět docházelo k zaizolování vodivých vláken a anizotropii povrchové rezistivity způsobovala antistatika v osnově. Při měření se vzdáleností elektrod $l_4 = 6\text{cm}$ docházelo k méně výraznému projevu anizotropních vlastností. To mohlo být zapříčiněno vzdáleností elektrod a větší roztečí antistatika v osnově.

Skupina d)

Tato skupina neobsahovala žádná vodivá vlákna ve směru osnovy, pouze ve směru útku s variabilní roztečí. Svůj vliv na elektrické vlastnosti měla struktura příze vzorků. V důsledku

jemnějších fibril a jejich většímu počtu ve směru útku docházelo k izolaci antistatik, což vedlo k izotropním elektrickým vlastnostem textilií.

K tomu, aby byla funkčnost přípravku lépe dokazatelná, byly naměřeny hodnoty anizotropie rezistivity ve směrech $0^\circ - 360^\circ$. Výsledky měření byly porovnány s hodnotami naměřenými v oblasti $0^\circ - 90^\circ$ se vzdáleností elektrod $l_3 = 4\text{cm}$. Ukázka obou měření je znázorněna na obrázcích 111 a 112.



Obr.111: vzorek 1c ($0-90^\circ$)

Obr.112: vzorek 1c ($0-360^\circ$)

Obrázky nám srovnávají průběhy křivek vzorku 1c. Na obrázku 111 je vykreslen graf měření ve směrech $0^\circ - 90^\circ$. Jeho průběh je plynulejší, jelikož hodnoty tvořící křivku jsou průměrnými hodnotami získanými z deseti různých vzorků tkaniny 1c. Obrázek 112 popisuje anizotropii rezistivity získanou z měření ve směrech $0^\circ - 360^\circ$. Z pohledu na oba obrázky je zřejmá podobnost průběhů obou grafů. To nám dokazuje nejen správnost měření v oblasti úhlů $0^\circ - 90^\circ$, ale i funkčnost přípravku.

5. ZÁVĚR

Cílem této práce bylo ověřit metodiku měření anizotropie elektrické rezistivity materiálů přístrojem Hewlett Packard 4339-B a funkčnost přípravku. Měření bylo aplikováno na tkaniny se stejnou vazbou K 2/1, do kterých bylo zatkáno vodivé vlákno s variabilní roztečí. Anizotropie rezistivity vláken byla měřena pro čtyři různé vzdálenosti elektrod ($l_1 = 1\text{cm}$, $l_2 = 2\text{cm}$, $l_3 = 4\text{cm}$ a $l_4 = 6\text{cm}$). Ve všech vzdálenostech byly měřeny hodnoty v oblasti úhlů 0° , 10° až 90° . Toto rozmezí úhlů bylo dostačující k získání elektrických vlastností vzorků. V laboratoři se hodnoty relativní vlhkosti ovzduší a teploty pohybovaly v rozmezí $\varphi=30\text{-}35\%$ a $t=22\text{-}24^\circ\text{C}$. Naměřené hodnoty rezistence byly zpracovány pomocí skriptu v programu Matlab, kde byly získány grafy popisující anizotropii jednotlivých vzorků ve směrech 0° až 360° .

V průběhu experimentu se nejvíce projevovala anizotropie rezistivity pro měření se vzdáleností elektrod přípravku $l_3 = 4\text{cm}$. Izotropní vlastnosti byly naměřeny pro vzorky 1d, 2d, 3d, 4d, Spolsin a Vektron. Vzorek 4d ve struktuře neobsahoval vodivé vlákno, což zaručovalo izotropii. U tkaniny Vektron s plátňovou vazbou, kde bylo uhlíkové vlákno zatkáno s roztečí $5 \times 5 \text{ mm}$, byly také prokázány izotropní vlastnosti. Vzorek Spolsin tvořen keprovou vazbou K 2/1 obsahoval vodivé vlákno přímo v směsi materiálu. Vzorky 1d, 2d a 3d obsahovaly antistatika pouze v útku, kde docházelo k zaizolování vodivého vlákna způsobené jemnějšími fibrilami a jejich větším počtem, a to vedlo k izotropním vlastnostem.

Pro získání dalších parametrů potvrzujících funkčnost přípravku byly všechny vzorky podrobeny měření v rozmezí úhlů $0^\circ - 360^\circ$ při vzdálenosti elektrod $l_4 = 6 \text{ cm}$. Byly naměřeny hodnoty elektrické rezistence vzorků Vektron a Spolsin lišící se vazbou, respektive použitím vodivého vlákna přímo ve směsi materiálu. Srovnatelností obou měření se prokázala funkčnost přípravku.

Výsledky měření mohou být použity pro kompletní popis elektrických vlastností textilií a jedno z konkrétních využití může být polohování stříhových dílů při šití ochranných oděvů z antistatických textilií. Při použití takových oděvů nesmí například docházet k hromadění náboje ve švech.

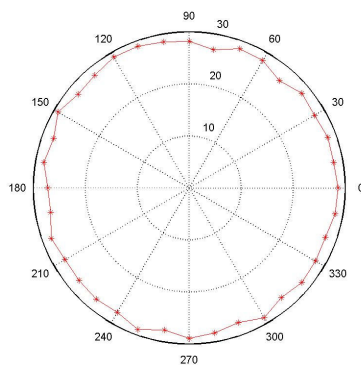
Pro další zkoumání by se jako zajímavá oblast mohlo jevit zkoumání anizotropie rezistivity textilií při měření objemové rezistence nebo v závislostech na vlhkosti ovzduší.

6. SEZNAM LITERATURY

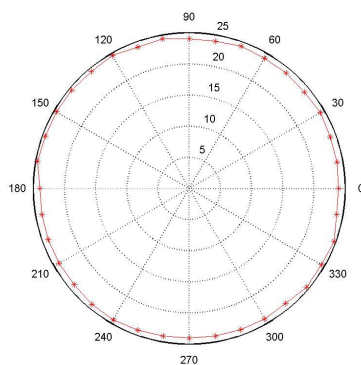
- [1] Meissner, B. – Zilvar, V.: Fyzika polymerů. Struktura a vlastnosti polymerních materiálů. SNTL/ALFA, Praha, 1987
- [2] Haňka, L.: Teorie elektromagnetického pole. SNTL, Praha, 1975. EP
- [3] Jambech, M. – Pikler, A. – Diačik, I.: Fyzika vlákien. Alfa, Bratislava, 1988
- [4] Votruba, V. – Muzikář, Č.: Teorie elektromagnetického pole. NČSAV, Praha, 1961
- [5] Košková, B.: Struktura a vlastnosti vláken. VŠST, Liberec, 1989
- [6] Krempaský, J.: Fyzika. Alfa SNTL, Bratislava, 1987
- [7] Košková, B. – Košek, M.: Struktura a vlastnosti vláken (laboratorní cvičení). VŠST, Liberec, 1991
- [8] Richter, A. – Odvárka, J. – Maršálková, M.: Způsob měření anizotropie elektrické rezistivity materiálů a zařízení k jeho provádění. TUL, Liberec, 2003
- [9] Maršálková, M.: Fyzika dielektrika, TUL – FT, Liberec, 2002
- [10] Maršálková, M.: Chemická vazba a elektrické vlastnosti textilií, TUL – FT, Liberec, 2001
- [11] Meloun, M. – Militký, J.: Statistické zpracování experimentálních dat, Praha, 2004
- [12] Horák, Z. – Krupka, F.: Fyzika. SNTL, Praha, 1966
- [13] Greg, J.: Uhlíková vlákna. Liberec. TU – fakulta pedagogická, KCH, 2002.
- [14] Militký, J.: *Textilní vlákna*, Liberec, 2002
- [15] Kratochvíl, B. – Švorčík, V. - Vojtěch D.: *Úvod do studia materiálů*, VŠCHT – Praha
- [16] Wagner, J. – Kopál, A.: Fyzika II. díl. VŠST, Liberec, 1985
- [17] Iwasaki, Y. – Operation Manual – HP 4339B High Resistance Meter, Kobe, 1998
- [18] http://hugo.aktualne.cz/ext_el/fyz/pas_teor.php
- [19] http://hugo.aktualne.cz/ext_el/fyz/vazba.php
- [20] <http://www.xray.cz/krystalografie/str07a.htm>
- [21] <http://www.xray.cz/krystalografie/str07a.htm>
- [22] <http://www.spolsin.cz/>

7. PŘÍLOHY

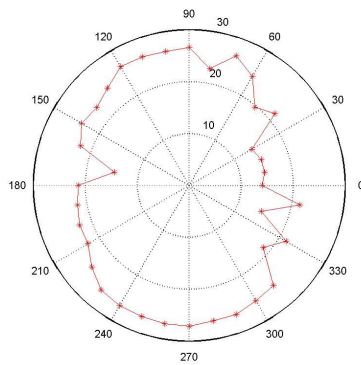
Grafy vzorků pro měření ve směrech 0° - 360°



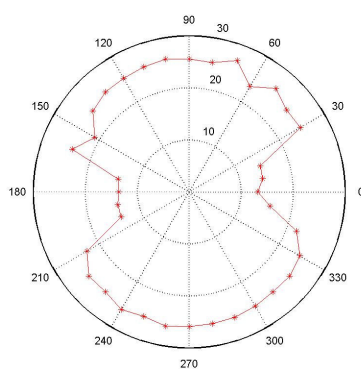
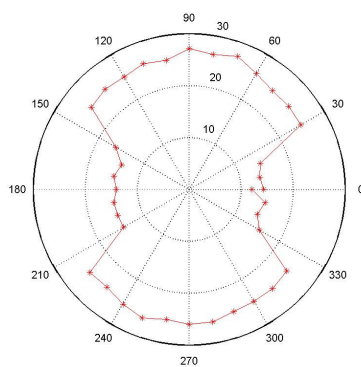
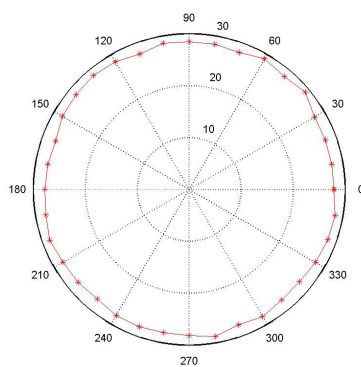
Graf rezistence vzorku Vektron

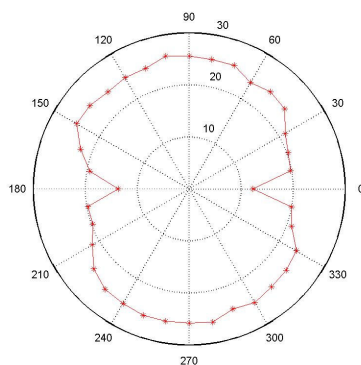
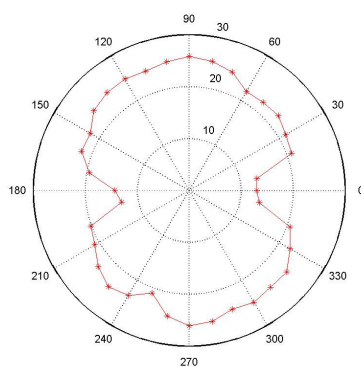
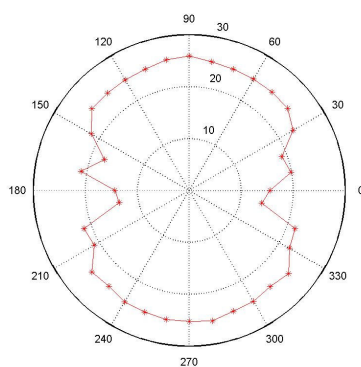


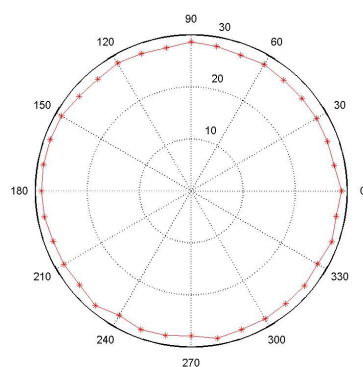
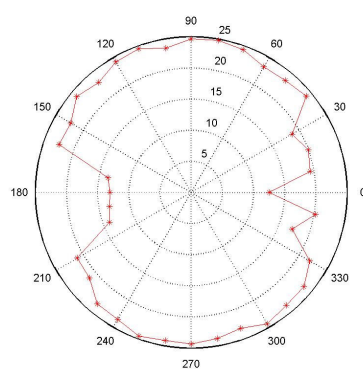
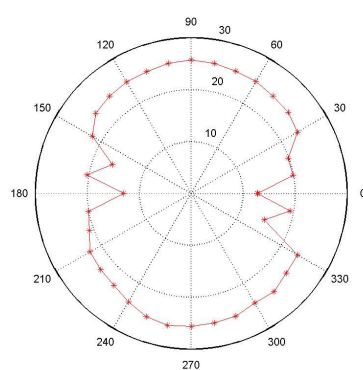
Graf rezistence vzorku Spolsin

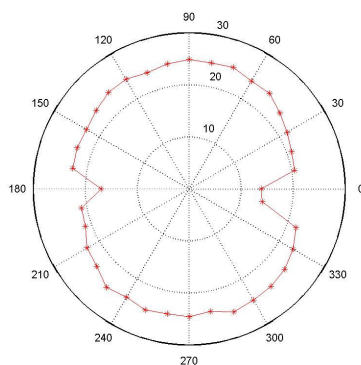
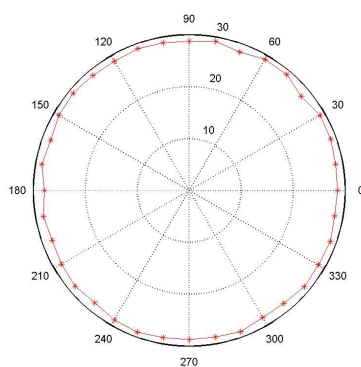
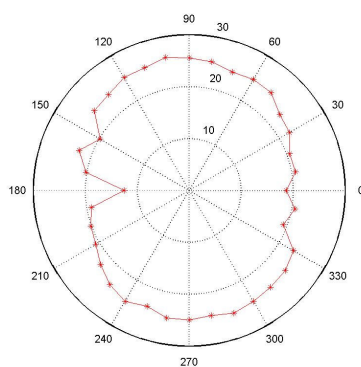


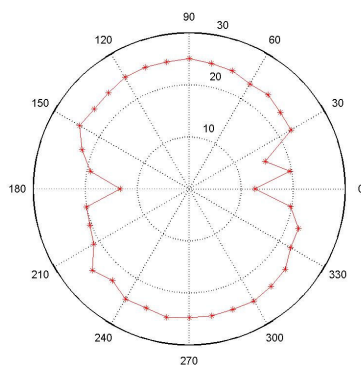
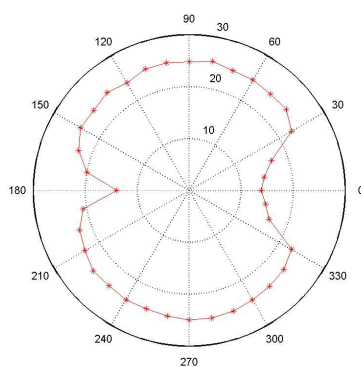
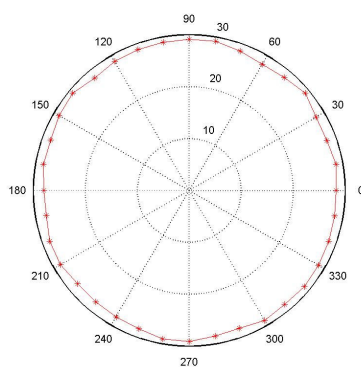
Graf rezistence vzorku 1a

**Graf rezistence vzorku 1b****Graf rezistence vzorku 1c****Graf rezistence vzorku 1d**

**Graf rezistence vzorku 2a****Graf rezistence vzorku 2b****Graf rezistence vzorku 2c**

**Graf rezistence vzorku 2d****Graf rezistence vzorku 3a****Graf rezistence vzorku 3b**

**Graf rezistence vzorku 3c****Graf rezistence vzorku 3d****Graf rezistence vzorku 4a**

**Graf rezistence vzorku 4b****Graf rezistence vzorku 4c****Graf rezistence vzorku 4d**